

# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ  
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

REALIZACE HUDEBNÍHO EFEKTU CHORUS S BBD

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE  
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE  
AUTHOR

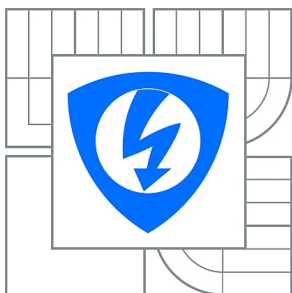
FILIP ČERNÝ

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH  
TECHNOLOGIÍ**

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION  
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

## **REALIZACE HUDEBNÍHO EFEKTU CHORUS S BBD**

REALIZATION OF THE CHORUS EFFECT WITH BBD

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**FILIP ČERNÝ**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. KAMIL ŘÍHA, Ph.D.**

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ  
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií**

**Ústav telekomunikací**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor  
**Teleinformatika**

**Student:** Filip Černý

**ID:** 119378

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2010/2011

## NÁZEV TÉMATU:

**Realizace hudebního efektu Chorus s BBD**

## POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Nastudujte teoreticky funkci efektu CHORUS realizovaného pomocí nábojově vázaných struktur BBD. Cílem práce je kompletní konstrukce laboratorního přípravku včetně návodu pro měření. Přípravek bude umožňovat napojení měřicích a zobrazovacích zařízení v důležitých místech, změnu parametrů řídicího signálu (úroveň, frekvence, tvar vlny) a statický režim. Výstupem řešení projektu zahrnuje i mechanickou konstrukci a zabudovaný napájecí zdroj se vstupem 230 V.

## DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] MELEN, R., BUSS, D. Charge coupled devices: Technology and Applications. IEEE Press, New York, 1977
- [2] PUNČOCHÁŘ, J. Operační zesilovače v elektronice. BEN - technická literatura, Praha, 1996
- [3] VRBA, K., Analogová technika. Studijní materiál ke stejnojmennému kurzu. Ústav telekomunikací FEKT VUT Brno

**Termín zadání:** 7.2.2011

**Termín odevzdání:** 2.6.2011

**Vedoucí práce:** Ing. Kamil Říha, Ph.D.

**prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.**  
*Předseda oborové rady*

## UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Cílem práce je návrh a konstrukce nového laboratorního zařízení umožňující realizaci hudebního efektu CHORUS. Součástí práce je teoretický rozbor efektů využívajících zpožďovací linky a obvodů nábojově vázaných struktur s BBD.

Další část se zabývá návrhem jednotlivých částí zařízení. Zařízení je zkonstruováno podle jednotlivých kritérií a konstrukčních doporučení. Zařízení je zkonstruováno pro měřicí účely a proto obsahuje různé nastavovací prvky.

Poslední část se zabývá testováním zařízení a samotným návodem pro měření na tomto přípravku v laboratoři Studiové a hudební elektroniky.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Hudební efekt, CHORUS, BBD, zpožďovací linka

## **ABSTRACT**

The aim of this thesis is conception and construction of new laboratory device enabling realization of the musical effect CHORUS. Part of this work is theoretical analyses of effects using delay line and charge coupled devices with BBD.

The next part is dealing with conception of particular sections of the device. The device is constructed by individual standards and construction recommendation. The device is constructed for measurement purposes therefore it contains various setting elements.

The final part is dealing with testing of the device and with a manual for measuring on this device in laboratory of musical electronic.

## **KEYWORDS**

Music effect, CHORUS, BBD, delay line

Černý, F. *Realizace hudebního efektu Chorus s BBD*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011 43 s., 6 s. příloh. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Kamil Říha, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Realizace hudebního efektu Chorus s BBD jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené semestrální práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této semestrální práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

## PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Kamilovi Říhovi, PhD. za účinnou, pedagogickou a odbornou pomoc, svůj čas a další cenné rady při zpracování práce. Dále také děkuji Ústavu telekomunikací za poskytnutí přístupu do projektové laboratoře.

V Brně dne .....

.....

(podpis autora)

# OBSAH

## Obsah

## Seznam obrázků

## Seznam tabulek

<b>Úvod</b>	<b>10</b>
<b>1 Hudební efekty se zpožďovací linkou</b>	<b>11</b>
1.1 Efekty se zpožďovací linkou s konstantním zpožděním.....	11
1.2 Efekty se zpožďovací linkou s proměnným zpožděním .....	12
<b>2 BBD posuvný registr na principu CCD</b>	<b>14</b>
2.1 Princip BBD, bipolární integrovaný obvod .....	14
2.2 Integrovaný obvod MOS .....	15
<b>3 Základní vztahy</b>	<b>17</b>
<b>4 Realizace Přípravku</b>	<b>18</b>
4.1 Generátor pomaluběžných průběhů (LFO).....	19
4.2 Dolní propusti .....	20
4.2.1 Dolní propust 2. řádu	21
4.2.2 Dolní propust 4. řádu	21
4.3 Ovládací a pomocné jednotky.....	22
4.4 Napěťově řízený oscilátor (VCO).....	23
4.5 Analogový posuvný registr (Obvod MN3207 a MN3102).....	24
4.5.1 MN3102	25
4.5.2 MN3207	26
4.6 Vstupní a výstupní obvody .....	26
4.6.1 Vstupní díl	26
4.6.2 Výstupní díl	27
4.7 Napájecí zdroj zařízení .....	27
4.7.1 Odporový drát z Konstantanu	29
<b>5 konstrukce DPS a samotného zařízení</b>	<b>32</b>
<b>6 Návod laboratorní úlohy</b>	<b>36</b>
6.1 Postup.....	36
<b>7 Závěr</b>	<b>40</b>

<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>42</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1.1: Základní blokové schéma efektů [11] .....	11
Obr. 1.2: Blokové schéma efektů s proměnným zpožděním .....	13
Obr. 2.1: Bipolární obvod BBD (a) a řez jedním monolitickým integrovaným článkem (b) [5] .....	15
Obr. 2.2: MOS obvod BBD (a) , řez integrovaným obvodem (b) [5] .....	16
Obr. 2.3: MOS integrovaná zpožďovací linka BBD s 2 x 36 články na čipu o rozměrech 1,5 x 2,4 mm [5].....	16
Obr. 4.1: Blokové schéma zařízení efektu CHORUS.....	19
Obr. 4.2: Schéma zapojení generátoru pomaluběžných průběhů .....	20
Obr. 4.3: Dolní propust 4. řádu s rozvětvenou smyčkou .....	22
Obr. 4.4: Schéma zapojení ovládací pomocné jednotky.....	23
Obr. 4.5: Schéma zapojení VCO .....	24
Obr. 4.6: Schéma zapojení obvodu MN3207 [7].....	25
Obr. 4.7: Blokové schéma obvodu MN3102 [6] .....	26
Obr. 4.8: Schéma zapojení vstupního dílu.....	27
Obr. 4.9: Schéma zapojení výstupního dílu.....	27
Obr. 4.10: Schéma napájecího zdroje realizovaného pomocí transformátoru.....	28
Obr. 4.11: Schéma zapojení napájecího zdroje.....	29
Obr. 5.1: Deska plošných spojů zařízení ze strany spojů .....	33
Obr. 5.2: Deska plošných spojů zařízení ze strany součástek .....	33
Obr. 5.3: Osazená deska plošných spojů zařízení.....	35
Obr. 6.1: Předpokládaný průběh pilovitého signálu .....	36
Obr. 6.2: Předpokládaný průběh harmonického signálu.....	37
Obr. 6.3: Předpokládaný průběh komplementárních řídicích signálů .....	37
Obr. 6.4: Průběh vstupního signálu před a za dolní propustí – 1kHz .....	38
Obr. 6.5 Průběh vstupního signálu před a za dolní propustí – 10kHz .....	38
Obr. 6.6: Předpokládaný průběh výstupního signálu za BBD .....	39
Obr. 6.7: Předpokládaný výstupní signál efektu CHORUS.....	39

## SEZNAM TABULEK

Tab. 4.1: Tabulka základních fyzikálních vlastností konstantanu .....	29
Tab. 4.2: Tabulka vypočtených hodnot změny odporu po různá $t$ .....	31

# ÚVOD

Zvukový efekt CHORUS patří do skupiny efektů, které ke své realizaci používají obvody zpožďovací linky. To znamená, že se okamžitá úroveň přímého signálu zapíše do posuvného registru a jeho následné čtení odpovídá určitému časovému posunu závislého na kmitočtu taktovacího signálu. Tento zpožděný signál se sečte v součtovém obvodu s původním (přímým) signálem a tím dostaneme námi zmiňovaný efekt. Do této skupiny efektů můžeme dále zařadit efekty ECHO a FLANGER. Jejich odlišnost je v různé hodnotě zpoždění signálu nebo v různém zapojení vazeb mezi obvody.

Zpracovaný signál pochází nejčastěji z reálného hudebního nástroje. V praxi se nejběžněji z hudebních nástrojů používá kytara, jejíž frekvenční rozsah (spektrum) je od 80 do 800 Hz. Pro srovnání zde můžeme uvést například i klavír, který dokáže obsáhnout 7 – 8 oktáv. Hodnoty frekvenčního rozsahu klavíru se pohybují přibližně od 20 Hz do 4,1 kHz.

CHORUS efekt vytváří dojem bohatého zvuku. Ten je prostorově neurčitý a celkově plnější. Název CHORUS je odvozen z toho, že při použití tohoto efektu vzniká iluze dvou či více nástrojů (hlasů), hrajících stejnou pasáž dohromady, kdy nastávají jemné rozdíly nejen ladění ale i v časovém průběhu.

# 1 HUDEBNÍ EFEKTY SE ZPOŽĎOVACÍ LINKOU

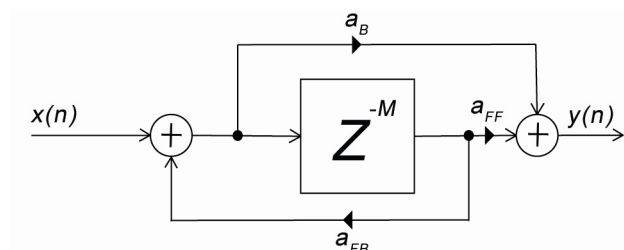
V této kapitole jsou zobrazeny principy efektů, které využívají ke své realizaci zpožďovací linku. Základní blokové schéma efektů je zobrazeno na Obr. 1.1. Jedná se zde o tzv. univerzální hřebenový filtr. Jde vlastně o speciální kmitočtový filtr, který zpracuje vstupní signál a zpozdí ho o určitý počet vzorků. Z obrázku je patrné, že různé signály jsou ve schématu násobeny určitými konstantami. Tyto konstanty mohou nabývat dvou hodnot 0 nebo 1, podle vybraného typu filtru. Vstupní signál  $x(n)$  postupující přímou větví je násobený konstantou  $a_B$  (*blend*) a sečtený se signálem, který je zpožděný o  $M$  vzorků a násobený konstantou  $a_{FF}$  (*feedforward*). Z výstupu zpožďovací linky je na vstup přiveden zpětnovazební signál násobený konstantou  $a_{FB}$  (*feedback*). Podle [11] pro výstupní  $y(n)$  signál platí, že

$$y(n) = a_B x(n) + (a_B a_{FB} + a_{FF}) v(n - M)$$

$$v(n) = x(n) + a_{FB} v(n - M) , \quad (1.1)$$

kde  $x(n)$  je vstupní signál,  $v(n)$  je stavová proměnná a přenosová funkce  $H(z)$  je

$$H(z) = \frac{a_B + (a_B a_{FB} + a_{FF} - a_{FB}) Z^{-M}}{1 - a_{FB} Z^{-M}} . \quad (1.2)$$



Obr. 1.1: Základní blokové schéma efektů [11]

## 1.1 Efekty se zpožďovací linkou s konstantním zpožděním

Do této podskupiny patří efekty, které používají hřebenový filtr typu FIR. FIR filtr je univerzální hřebenový filtr se zesílením přímé větve  $a_B = 1$  a zesílením zpětnovazební větve  $a_{FB} = 0$ . Z hodnot je patrné, že sluchový vjem bude závislý na řádu hřebenového filtru, tzn. na době zpoždění signálu. Podle hodnoty zpoždění můžeme v této podskupině efekty rozdělit na:

1. Zpoždění linky je menší než 25 ms. Patří sem PHASE SHIFTER nebo RESONATOR.
2. Zpoždění linky nabývá hodnot od 25 ms do 50 ms. Patří sem SLAPBACK, SLAPBACK ECHO nebo DOUBLING.

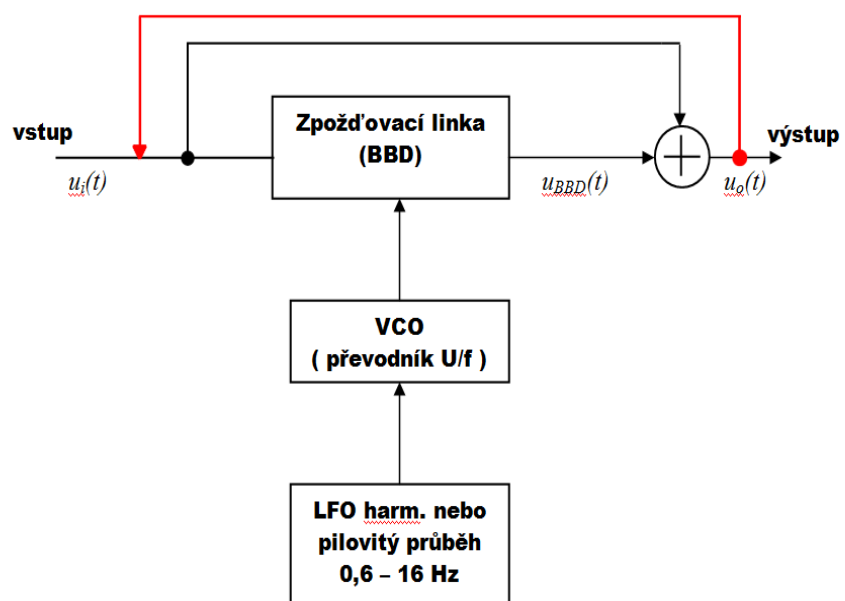
3. Zpoždění linky je větší než 50 ms. Taková hodnota je lidským uchem vnímána jako ozvěna a dává jméno efektu ECHO.

## 1.2 Efekty se zpoždovací linkou s proměnným zpožděním

Tato podskupina efektů využívá zpoždovací linku, jejíž doba zpoždění je v čase periodicky proměnná. Blokové schéma této podskupiny efektů je zobrazeno na Obr. 1.2. V praxi se tyto efekty realizují analogovou nebo digitální cestou. Proměnné zpoždění je v analogových efektech realizováno pomocí analogového posuvného registru. Jeho zpoždění je řízeno obvodem VCO (Obr. 1.2). VCO je označení pro napětově řízený generátor obdélníkových kmitů, který při analogové realizaci umožňuje přenos hodnoty signálu mezi jednotlivými buňkami posuvného registru. Tím je dáno i celkové zpoždění celé linky, na níž má také vliv počet paměťových buněk registru. Na uvedeném Obr. 1.2 je blok označený LFO, který se používá k tzv. rozmítání VCO. Takto označený blok je nazýván nízkofrekvenční oscilátor s kmitočtem z rozsahu 0,6 – 16 Hz. Kmitočet LFO určuje rychlost a amplituda hloubku použité modulace. Jako výstupní průběhy signálů z LFO se používají nejvíce harmonické, pilové signály. Dále můžeme použít i impulsní, pilovité nebo náhodné signály. Mezi nejvýznamnější efekty této podskupiny jsou:

1. Efekt VIBRÁTO, který využívá ke svému rozmítání sinusového průběhu signálu. Hloubka modulace efektu je 1 až 3 ms.
2. Efekt CHORUS, který neobsahuje zpětnovazební větev a je tedy její zesílení  $a_{FB} = 0$ . Výsledný efekt vznikne sečtením původního signálu a zpožděného signálu procházejícího zpoždovací linkou. Hloubka modulace efektu je různá a dosahuje hodnot od 1 do 30 ms. K rozmítání VCO pomocí LFO se dají použít všechny typy průběhů.
3. Efekt FLANGER pracuje na stejném principu jako efekt CHORUS. Oproti výše uvedenému efektu však využívá nenulové zesílení zpětnovazební větve. Uvedeno na Obr. 1.2 červenou barvou. K rozmítání se většinou využívá sinusového průběhu z LFO.

U efektů této podskupiny je možné zvýšit účinnost efektu na požadovaný vstupní signál. To je možné způsobit například přidáním dalších zpoždovacích větví, které nám signál rozdělí na jednotlivá pásma a ty pak na výstupu sečteme. Pro posluchače to způsobí hlubší vjem používaného efektu. V této práci se však tímto faktem nebudeme zabývat.



Obr. 1.2: Blokové schéma efektů s proměnným zpožděním

## 2 BBD POSUVNÝ REGISTR NA PRINCIPU CCD

Základním kamenem všech uvedených efektů, realizovaných v analogové podobě, je analogový posuvný registr, který nám zajišťuje zpoždění vstupního akustického signálu. Tento registr zde využívá principu CCD (Charge Coupled Devices), což jsou v podstatě obvody nábojově vázaných struktur. Na vstup tohoto článku nám přichází vstupní napětí, které je v podobě vzorku sejmuto a jeho hodnota je předávána z jednoho paměťového článku na druhý. Počet paměťových článků a rychlost předávání informace mezi články (kapacitory) nám přesně určuje velikost zpoždění, výstupního signálu z tohoto zařízení, vstupního signálu.

### 2.1 Princip BBD, bipolární integrovaný obvod

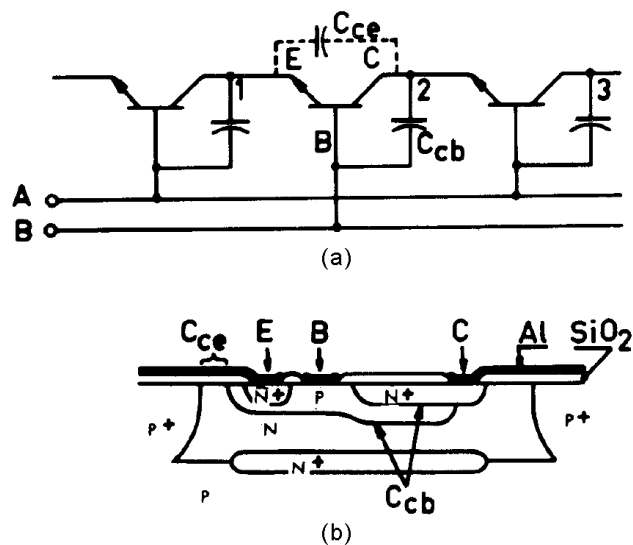
Jedná se o variabilní zpožďovací linku pro zpracování analogových signálů realizovanou jako integrovaný obvod, vyvinutou v roce 1969 F. Sangsterem a K. Teerem z Philips Research Labs.

Základem linky je řada paměťových kapacitorů  $C_0$  až  $C_N$  a obvodů posouvajících náboj od jednoho k druhému, které dohromady pracují jako analogový posuvný registr. Uložený analogový signál se v podobě vzorků pohybuje podél řady kondenzátorů. Rychlost posunu náboje je dána taktovacím signálem. Jeden krok znamená přesun náboje mezi články (kapacitory). Tato rychlost přesunu se dá měnit externě. Tomuto principu se říká BBD = Bucket Brigade Device (obvod kbelíkové brigády). Název se zavedl proto, že je zde obdobná podobnost jako při hašení požáru pomocí „brigádníků“, tj. předávání kbelíku naplněného vodou od jednoho k druhému.

Zajímavé je, že se hodnota náboje neuchovává jako přímá velikost (úroveň) náboje, ale jako jeho deficit. Toto provedení vede k tomu, že můžeme mít jednoduchý obvod (Obr. 2.1 (a)) pouze s jedním tranzistorem na jeden paměťový prvek (kapacitor). Toto provedení je velice výhodné a je méně komplikované, než je tomu u jiných analogových zpožďovacích linek.

Zpožďovací linka používá dvou komplementárních hodinových signálů s frekvencí, jejíž hodnota je rovna polovině hodnoty vzorkovací frekvence vstupního signálu. Díky tomu je možné v zařízení měnit šířku pásma a zpoždění zařízení v rozsáhlých mezích. Zpoždění signálu může být přesně řízeno nebo může být měněno i elektronicky.

Na Obr. 2.1 (a) je zapojení zpožďovací linky realizováno jako jednoduché zapojení tranzistorů v sérii. Paměťový článek (kapacitor) je v obvodu umístěn mezi kolektorem a bází spínacího tranzistoru. Na obrázku je zobrazena parazitní Millerova kapacita  $C_{CE}$ . Tato zvětšená parazitní kapacita vzniká mezi kolektorem a emitorem a je v integrovaném obvodu snadno realizovatelná. Na Obr. 2.1 (b) je zobrazen příčný řez bipolárním integrovaným paměťovým článkem, ve kterém je zobrazena zvětšená plocha mezi bází a kolektorem. Zvětšená plocha nám realizuje paměťový kapacitor  $C_{CB}$ .



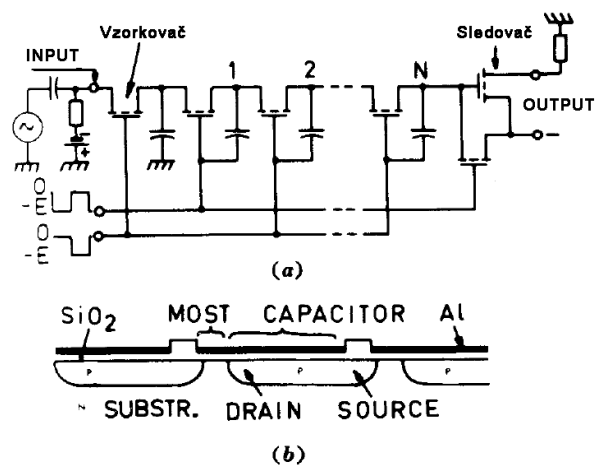
Obr. 2.1: Bipolární obvod BBD (a) a řez jedním monolitickým integrovaným článkem (b) [5]

Realizace obvodu nabízí i jisté překážky. Nesmíme zanedbat a vzít na vědomí působení parazitní Millerovy kapacity, která vzniká mezi kolektorem a emitorem tranzistoru. Vzorky signálu postupují řetězem kapacitorů a vzájemně na sebe působí. Kdyby se toto působení projevilo pouze nepatrně na jednom paměťovém článku našeho integrovaného obvodu, nemuselo by to být tak škodlivé, avšak po průchodu stovkami článků se hodnota akumuluje na námi již neakceptovatelnou hodnotu. To vše nastane díky zmíněné parazitní kapacitě, která způsobuje nedokonalý přenos signálu.

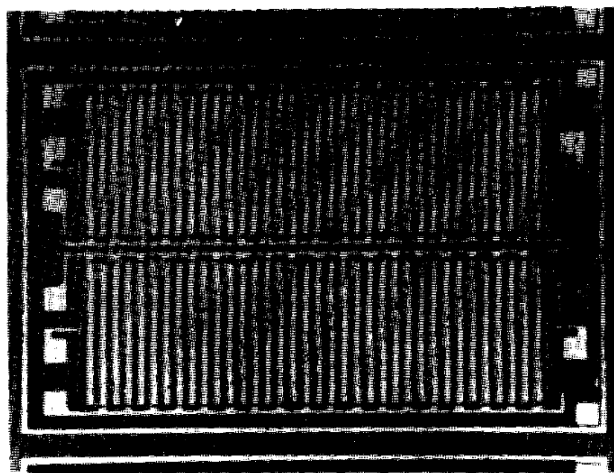
## 2.2 Integrovaný obvod MOS

Při použití MOS technologie vede koncepce BBD k ještě jednoduššímu uspořádání (Obr. 2.2(a)) než je tomu u uspořádání bipolární technologie. Jedna z výhod je, že můžeme vstupní a výstupní obvody vytvořit s menším počtem prvků. Dále zde neprobíhá přenos stejnosměrných proudů přes elektrodu Gate a i po průchodu stovkami článků můžeme útlum přenášeného náboje zanedbat. Díky této výhodě zde není potřebný zesilovač pro zesílení utlumeného signálu. Paměťový kapacitor (Obr. 2.2 (b)) je tvořen zvětšenou hliníkovou vrstvou elektrody Gate a P oblastí pod ní. Uspořádání v MOS technologii je mnohem jednodušší, protože jednotlivé články jsou umístěny vedle sebe a elektroda Drain předcházejícího článku tvoří elektrodu Source článku následujícího.





Obr. 2.2: MOS obvod BBD (a) , řez integrovaným obvodem (b) [5]



Obr. 2.3: MOS integrovaná zpožďovací linka BBD s 2 x 36 články na čipu o rozměrech 1,5 x 2,4 mm [5]

Na Obr. 2.3 je zobrazen p-kanálový MOS integrovaný obvod, skládající se ze 72 článků s 8pF paměťovými kapacitami. Velikost čipu je 1,5 x 2,4mm. Vyrobený čip byl experimentálně použit pro zpracování řeči a zpoždění audio signálu. [5]

### 3 ZÁKLADNÍ VZTAHY

V dnešní době jsou v zařízeních využívající analogové posuvné registry na principu BBD nejvíce používány odvozy z řady začínající písmeny MN. Takto označené obvody vyrábí firma Panasonic a v našem zařízení bude konkrétně použit typ MN3207, který obsahuje 1024 paměťových článků, viz. [7]. Na blokovém schématu jednoduchého efektu CHORUS (Obr. 1.2) jsou zakresleny základní signály  $u_i(t)$ ,  $u_{\text{BBD}}(t)$  a  $u_o(t)$  na jejichž bližší matematický popis se podíváme:

- průběh napětí vstupního signálu, který přichází do obvodu BBD:

$$u_i(t) = \sin \omega t, \quad (3.1)$$

zde  $\omega$  je úhlová frekvence a  $t$  je čas

- průběh napětí na výstupu z BBD:

$$u_{\text{BBD}}(t) = \sin \omega(t + \tau), \quad (3.2)$$

zde  $\tau$  představuje okamžitou hodnotu zpoždění danou taktovací frekvencí napěťově řízeného oscilátoru (VCO)

- průběh napětí za sčítacím obvodem, a tedy výstupním napětím efektu bude:

$$u_o(t) = \sin \omega t + \sin \omega(t + \tau). \quad (3.3)$$

## 4 REALIZACE PŘÍPRAVKU

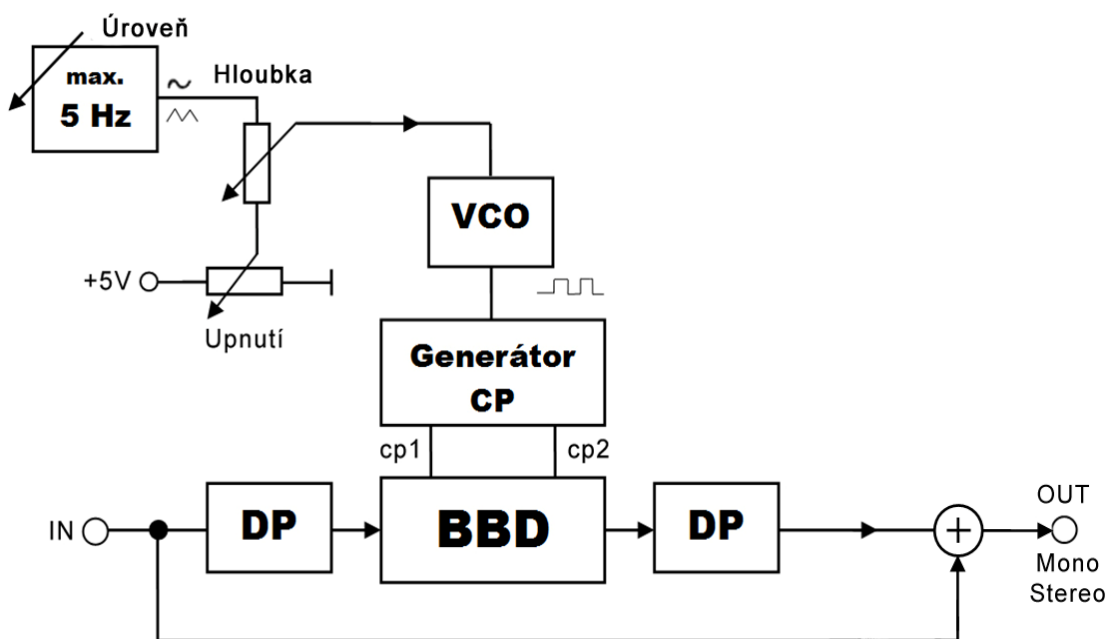
Na základě zadání, dostupné analýzy technické dokumentace zařízení BOSS CE-5 Chorus Ensemble [1], PŘÍLOHA 1 a diplomové práce (podrobné dokumentace) k stávajícímu zařízení v laboratoři [10] jsme si stanovili postup při realizaci projektu. Zařízení efektu CHORUS v laboratoři je více větvového charakteru, neboli má 3 efektové větve s přesně definovaným fázovým posunem a to o  $120^\circ$ . Taková struktura není velice vhodná, a proto je v zařízení nepodstatná. Nově realizované zařízení bude mít pouze jednu efektovou větev. Stávající zařízení je již nějakou dobu v provozu a pracují na něm výhradně žáci laboratoři, kteří se řídí návodem k laboratorní úloze. Ti ale ne vždy „nejdříve čtou a poté konají práci na přípravku“. To vede k neustálému opotřebování a namáhání mechanických částí součástek a samotného přípravku. Vlivem času také dochází v zařízení k tzv. stárnutí součástek. Znamená to, že se jejich hodnota s ohledem na jejich toleranci mohla nepatrně změnit a může docházet k zkreslování výsledků při zobrazování různých průběhů při měření.

Celková základní koncepce zařízení je ponechána podle [10], ale pozměněna dle příslušných úprav pro nově konstruované zařízení. Blokové schéma (Obr. 4.1) se skládá z několika jednotlivých bloků, kterým se jednotlivě a podrobněji věnuje obsah této kapitoly. Na blokovém schématu je vidět, že se přípravek bude skládat z jedné přímé a jedné zpožděné (zpracovávající) větve s jejími příslušnými bloky. Na zpožděné větvi bude docházet ke zpracování vstupního akustického signálu a jeho výslednému zpoždění. Toto zpoždění bude řízeno díky LFO (nizkofrekvenčnímu) generátoru s maximální výstupní frekvencí 5 Hz. U generátoru bude možné měnit úroveň modulace (frekvenci) a za výstupem pomocí pomocných obvodu i její hloubku (amplitudu). V krajní poloze potenciometru ovládající úroveň modulace, kdy je jeho hodnota minimální, bude rozmitací průběh upnut na určitou hodnotu, která bude zajišťovat maximální frekvenci řídicího kmitočtu, a tím pádem minimální zpoždění posuvného registru s BBD.

Za účelem použití zařízení a zadání je na samotném výstupu LFO zařízení zařazen přepínač, který nám bude určovat tvar výstupní vlny, která bude přiváděna na vstup VCO. Dále je zde za tímto účelem zařazen další prvek nazvaný jako „Upnutí“. Tento prvek nám slouží k vykonávání statických měření, které vznikne v důsledku změny potenciálu, na který je upnuta minimální hodnota rozkmitu rozmitacího průběhu. Jak již bylo zmíněno, provádění statických měření bude možné při minimální (krajní) hodnotě potenciometru ovládajícího úroveň (frekvenci).

Další důležitým bodem dle zadání je, že zařízení má sloužit jako laboratorní prostředek do předmětu BSHE (Studiová a hudební elektronika). Z toho vyplývá, že na přípravku musí být vhodné svorky pro připojení různých měřicích přístrojů (osciloskop, generátor,...). Svorky by měly být pro svoji přehlednost dobře označené, nejlépe barevně a na vrchním krytu by měly být dobře označené ovládací prvky. Dobře označené a popsané ovládací prvky zařízení napomáhají k rychlejšímu seznámení uživatele s přípravkem a k jeho lehčímu ovládání. PŘÍLOHA 2 obsahuje návrh vrchního krytu zařízení.

Poslední konstrukční bod v zadání obsahuje podmínku, že zařízení musí mít samostatný napájecí zdroj se vstupem 230 V. Řešením bude, že zařízení bude připojeno na zakoupený AC/DC adaptér s příslušným výstupním napětím a proudem.



Obr. 4.1: Blokové schéma zařízení efektu CHORUS

## 4.1 Generátor pomaluběžných průběhů (LFO)

Jedná se o přesný funkční generátor s integrátorem z [13], který je zobrazen na Obr. 4.2, na jehož výstupu je zařazena dolní propust druhého řádu (viz. 4.2.1), která má za úkol vyfiltrování vyšších složek z pilovitého signálu. Tím nám vznikne harmonický signál s maximální frekvencí 5 Hz.

Operační zesilovače  $IC_{1A}$  a  $IC_{1B}$  jsou zapojeny jako komparátory, které se překlápí mezi svými maximálními hodnotami výstupního napětí, a to  $R_7/R_3$  pro kladnou polaritu přivedenou na invertující vstup a  $R_8/R_3$  pro zápornou polaritu přivedenou na tento vstup. Hodnota maximálního výstupního napětí je  $u_{vK}$ :

$$u_{vK} = \frac{100}{33} = 3,03 \text{ V} . \quad (5.1)$$

Tento fakt je velice výhodný, protože výstupní napětí je dáno poměry součástek a není určeno saturací OZ, jak je tomu u jiných mnohem jednodušších zapojení generátorů. Dále je zde zapojen OZ označený  $IC_{1C}$ , který je zapojený jako tzv. integrátor. Jeho hodnota výstupního napětí lineárně roste nebo klesá mezi mezními hodnotami přiváděnými na jeho vstup.

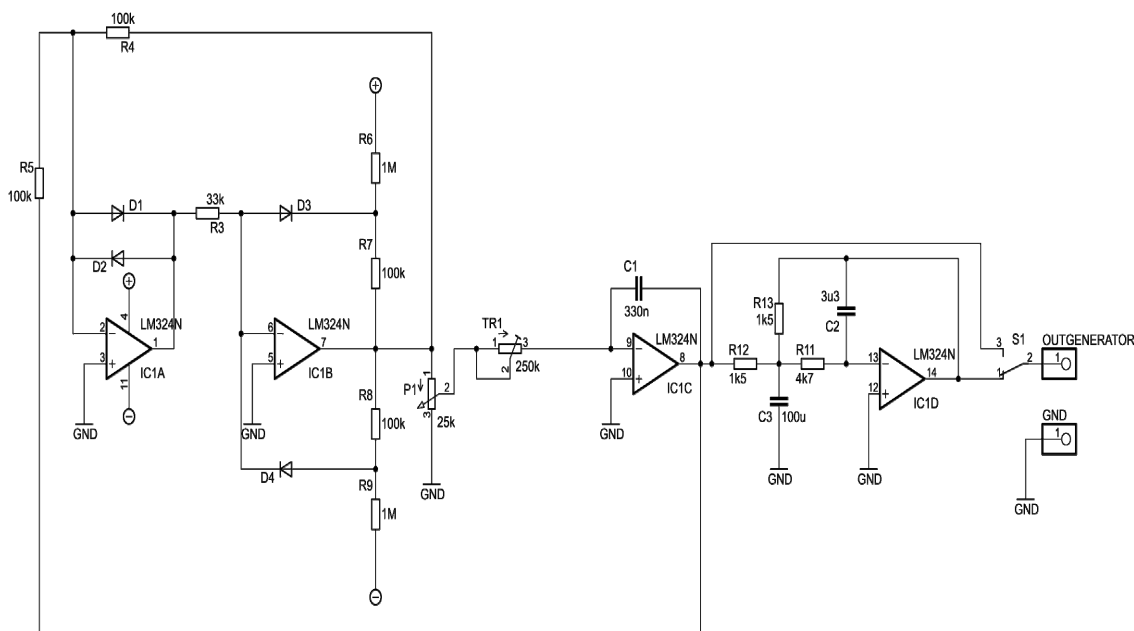
V [10] bylo nastavování úrovně (frekvence) realizováno pomocí součtu výstupních signálů z generátoru v určitém dělicím poměru. Zde je ovládání frekvence zjednodušeno a zapojeno přímo v generátoru. To nám zaručí potenciometr  $P_1$ , který bude zapojen jako zátěž a napětí na něm bude stejné jako výstupní napětí (průběh) na komparátoru  $IC_{1B}$ . Hodnota výstupní frekvence generátoru se podle [13] vypočítá ze vztahu:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\beta R_4}{4R_5 TR_1 C_5}, \quad (5.2)$$

kde  $\beta$  je dělicí poměr potenciometru  $P_1$ . Určíme si, že se hodnota odporu  $R_4$  bude rovnat  $R_5$  a vztah pro výpočet výstupní frekvence se nám zjednoduší na:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{\beta}{4TR_1 C_5}. \quad (5.3)$$

Bude-li potenciometr  $P_1$  v maximální poloze, tak je jeho dělicí poměr  $\beta = 1$ . Znamená to, že v této pozici generátor na výstupu udává svojí maximální frekvenci. Hodnota výstupní frekvence je tedy dána hodnotami kondenzátoru  $C_5$  a trimru  $TR_1$ . Tento trimr zde slouží k jemnému dostavení požadované výsledné hodnoty. Na konci generátoru je zařazen přepínač  $S_1$ , díky kterému si můžeme zvolit jeden ze dvou průběhů (harmonický nebo trojúhelníkový signál) rozmítacího výstupního napětí pro obvod VCO.



Obr. 4.2: Schéma zapojení generátoru pomaluběžných průběhů

## 4.2 Dolní propusti

V zařízení je použito několika filtračních členů. Z blokového schématu je vidět, že jsou to bloky označené DP, neboli dolní propust. V zařízení bylo vycházeno z [10], v které byly tyto propusti navrženy podle nejpříjemnějších požadavků. Byla použita dolní propust s rozvětvenou smyčkou zpětné vazby z [3]. Propust obsahuje dvě zpětnovazební smyčky. V blokovém schématu (viz. Obr. 4.1) jsou bloky označené jako DP, které nám znázorňují použití dolní propusti 4. řádu aproximované dle Bessela. Avšak výstupní dolní propust 2. řádu není v blokovém schématu přímo zobrazena. Tato dolní propust je zahrnuta do bloku generátoru LFO (bloku max. 5 Hz) a má za úkol odfiltrovat základní harmonickou složku z trojúhelníkového průběhu. Tím získáme na výstupu generátoru sinusový průběh. Tato propust je aproximována dle Čebyševa.

### 4.2.1 Dolní propust 2. řádu

Dolní propust 2. řádu je v našem zapojení použita pouze pro získání základní harmonické složky pilovitého průběhu s frekvencí 5 Hz. Propust má podle zvolené aproximace velice prudký pokles přenosové charakteristiky. To je pro nás velice výhodné, protože propust odstraní vyšší harmonické složky, které nám mohou výsledný průběh znehodnotit. Zapojení dolní propusti je zobrazeno na Obr. 4.2.

Přenos celé dolní propusti je označen  $K_0$ . K výslednému přenosu se dojde pomocí jednoduché analýzy obvodu. Pro stejnosměrné napětí mají kondenzátory  $C_2$  a  $C_3$  velkou impedanci a představují rozpojený obvod. Hodnota vstupního odpor  $OZ$  je velká oproti odporu  $R_3$ , a tím pádem ho můžeme zanedbat. Díky jednoduchým úpravám nám  $OZ$  zůstane zapojen jako invertující zesilovač a jeho přenos se rovná

$$K_0 = -R_{13} / R_{11} . \quad (5.4)$$

Koeficienty aproximace byly vyhledány v tabulkách v [3] a pro povolené zvlnění v propustné oblasti 3 dB jsou:

$$a_{21} = \omega_m C_2 (R_{13} + R_{11} + \frac{R_{13} R_{12}}{R_{13}}) = 1,0650 , \quad (5.6)$$

$$b_{21} = \omega_m C_2 C_3 R_{13} R_{11} = 1,0305 , \quad (5.7)$$

kde  $\omega_m = 2\pi f_m$  je úhlový kmitočet. Podle doporučeného pravidla nejdříve volíme hodnoty kondenzátorů. Důvodem je jejich vyšší toleranční hodnota. Proto Kondenzátory  $C_2$  a  $C_3$  zvolíme tak, aby odpovídaly funkční podmínce uvedené v [3]:

$$\frac{C_1}{C_2} \geq \frac{4b_{21}(1 - K_0)}{a_{21}^2} . \quad (5.8)$$

Hodnoty kondenzátorů vyšly  $C_2 = 3,3\mu F$  a  $C_3 = 100\mu F$ . Tyto kondenzátory budou tantalové, kde jejich tolerance hodnoty je 10%. Dále byly určeny hodnoty zbývajících odporů  $R_1$  až  $R_3$  podle vztahů z [3] a byly vybrány jejich nejbližší hodnoty z řady E12. K výpočtům nám pomohly výše uvedené hodnoty kondenzátorů a zvolené hodnoty mezní frekvence  $f_m$  pro  $K_0 = -1$ .

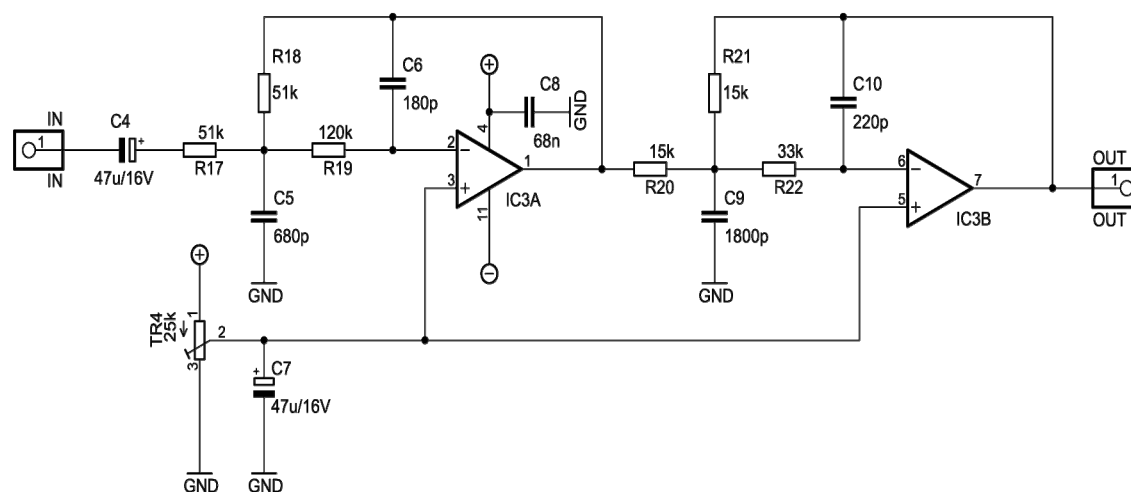
### 4.2.2 Dolní propust 4. řádu

Jak je vidět na blokovém schématu (Obr. 4.1), je dolní propust toho řádu v našem zařízení použita hned dvakrát. V prvním případě je použita jako vstupní antialiasingový filtr, který zajistí nezkrácení signálu při analogovém vzorkování, které provádí obvod BBD. V druhém případě je dolní propust použita jako výstupní rekonstrukční filtr, který má za úkol odstranění vysokofrekvenčních složek, vznikajících průchodem signálu zpoždovací linkou BBD. Na vstupu by tato dolní propust nebyla potřeba, kdybychom k zařízení připojovali nějaký z reálných nástrojů viz. Úvod. Na vstup zařízení je však možné přivést jakýkoliv vstupní signál. To je hlavním důvodem pro zařazení dolní propusti před zpoždovací linku BBD.

Vstupní signál přicházející od zdroje signálu k našemu zařízení, dodávající spektrum signálu, bude mít nejvyšší možnou frekvenci 4 kHz. Tento kmitočet byl zvolen jako nejvyšší možný mezní kmitočet pro tuto dolní propust. Určená hodnota vyhovuje také jiné podmínce a to že minimální udávaná podmínka taktovacího kmitočtu posuvného registru BBD je dle parametrů, který uvádí výrobce v [7], 10 kHz. To vyhovuje vzorkovací podmínce, že vzorkovací kmitočet musí mít minimálně dvojnásobnou hodnotu maximálního vstupního kmitočtu.

Realizace návrhu dolní propusti 4. řádu se od návrhu výše uvedené propusti 2. řádu liší pouze minimálně. Schéma zapojení se liší pouze tím, že máme za sebou (do série) zařazeny dvě dolní propusti 2. řádu. Další odchylka je v maximálním mezním kmitočtu ( $f_m = 4\text{kHz}$ ) a v aproximačních koeficientech uvedených v tabulce příslušné aproximace, viz. [13].

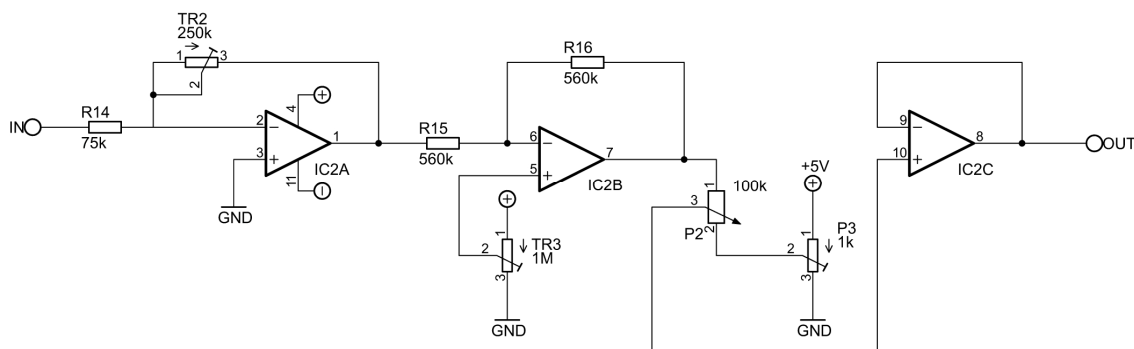
Na níže uvedeném Obr. 4.3 je zobrazeno celkové schéma dolní propusti 4. řádu. V levé dolní části je do obvodu zařazen trimr  $TR_4$ , který slouží podle nastavení jeho hodnoty k přivádění určitého stejnosměrného napětí na neinvertující vstup OZ. To způsobí jev tzv. superpozice. Námí přivedené stejnosměrné napětí se nasuperponuje vstupní signál. Zapojení je zde použito proto, že zpožďovací linka BBD vyžaduje, aby vstupní akustický signál nesoucí informaci byl superponován na určité stejnosměrné napětí. Hodnota napětí může být od 0 V do hodnoty napájecího napětí a musí být nastavena vhodně, aby vstupní signál nebyl zkreslen na samotném výstupu dolní propusti. Tento jev by mohl nastat například ořezáním signálu a změnou hodnoty jeho průběhu. Napájecí napětí udává výrobce (viz. [7]) a jeho maximální hodnota je 10 V.



Obr. 4.3: Dolní propust 4. řádu s rozvětvenou smyčkou

### 4.3 Ovládací a pomocné jednotky

Na Obr. 4.4 je uvedeno schéma ovládací a pomocné jednotky. Operační zesilovač  $IC_{2A}$  je zapojen jako invertující zesilovač, jehož zisk je možné měnit v rozsahu  $Au_{IC_{2A}} = 0 - 3,33$  pomocí trimru  $TR_2$ . Zesílení  $Au_{IC_{2A}}$  tohoto invertujícího OZ může být maximálně 3,3, avšak obvod VCO, jak uvádí výrobce v [14], dokáže zpracovat maximální hodnotu napětí 5V neboli hodnotu napájecího napětí. Hodnota výstupního napětí z generátoru je maximálně 3 V, proto musíme být opatrní při nastavování zesilujícího poměru.



Obr. 4.4: Schéma zapojení ovládací pomocné jednotky

Za prvním zesilujícím prvkem následuje další stupeň s invertující OZ IC<sub>2B</sub>, který má jednotkové zesílení  $Au_{IC2B} = 1$ . Na tomto členu je výstupní napětí předchozího OZ přivedené na invertující vstup. Výstupní napětí bude rovno průběhu napětí z invertujícího vstupu posunutého o stejnosměrnou složku. Stejnosměrnou složku nastavujeme pomocí trimru TR<sub>3</sub>.

Tyto dva členy jsou důležité pro správné nastavení signálu pro VCO. V [14] je uvedeno, že rozhodovací úroveň vstupního signálu může být pro hodnotu H min. 2 V a pro hodnotu L max. 0,8 V. Proto musíme nastavit na prvním členu velikost amplitudy alespoň 0,7 V a posun signálu na druhém členu na hodnotu 1,3 V. Při nastavování nesmíme zapomenout na podmínku max. napětí, které je schopen VCO zpracovat. Rozsah hodnot napětí pro VCO se tedy rovná velikosti rozkmitu (amplitudy) modulovaného efektu. Řízení hodnoty rozkmitu nám ve schématu zajišťuje potenciometr P<sub>2</sub>.

Na základě důkladného prostudování dokumentace k současnému přípravku [10] je realizován statický režim zařízení. Dolní vývod potenciometru není přiveden na zem, ale je přiveden na výstupní vývod potenciometru P<sub>3</sub>, který je přiveden na potenciál + 5 V. Tento potenciál totiž zajišťuje upnutí výsledného průběhu na tuto hodnotu. To je důležité proto, aby byla zajištěna minimální úroveň efektu při minimální výchylce ovládacího prvku řídícího tuto úroveň (P<sub>2</sub>). Minimální úroveň udává maximální taktovací kmitočet pro BBD a ten je zase dán horní hranicí rozmítacího napětí. Při této hodnotě jsou jednotlivé vzorky v BBD předávány co nejrychleji. To má za následek minimální hodnotu zpoždění (minimální vliv efektu na průchozí signál). Pokud bude potenciometr P<sub>2</sub> v minimální poloze, můžeme potenciometrem P<sub>3</sub> plynule měnit taktovací kmitočet pro BBD v celém rozsahu a budeme tedy vykonávat měření statických charakteristik.

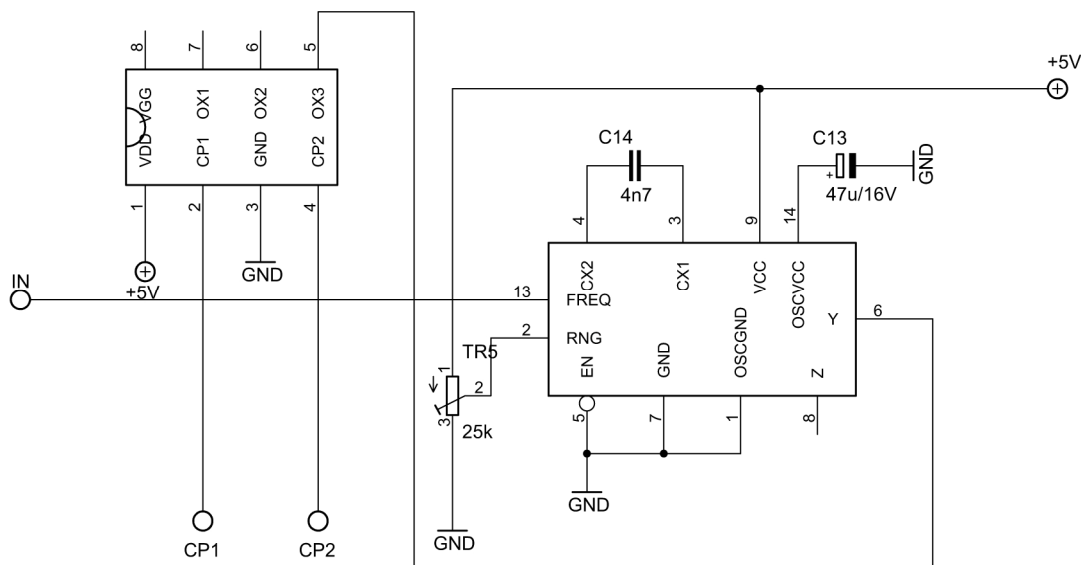
Na konci tohoto bloku je zařazen v podstatě jednoduchý neinvertující zesilovač s vysokým vstupním odporem a jednotkovým zesílením  $A_u = 1$ . Tomuto zapojení se říká sledovač napětí a používá se k oddělení zdrojů signálu s velkým výstupním odporem. V našem případě je zde zařazen, aby nebyl zatěžován dělič složený z P<sub>3</sub>.

## 4.4 Napětově řízený oscilátor (VCO)

Napětově řízený oscilátor VCO (Voltage Controlled Oscillator) je, jak již z názvu vyplývá, generátor taktovacích impulsů, jejichž frekvenci je možné řídit rozmítacím průběhem napětí v určitém napětovém rozsahu. Na Obr. 4.5 je zobrazeno schéma



zapojení VCO s jeho všemi potřebnými prvky. Kmitočtový rozsah výstupních pulzů se podle výrobce v [14] pohybuje od 1 Hz – 20 MHz.



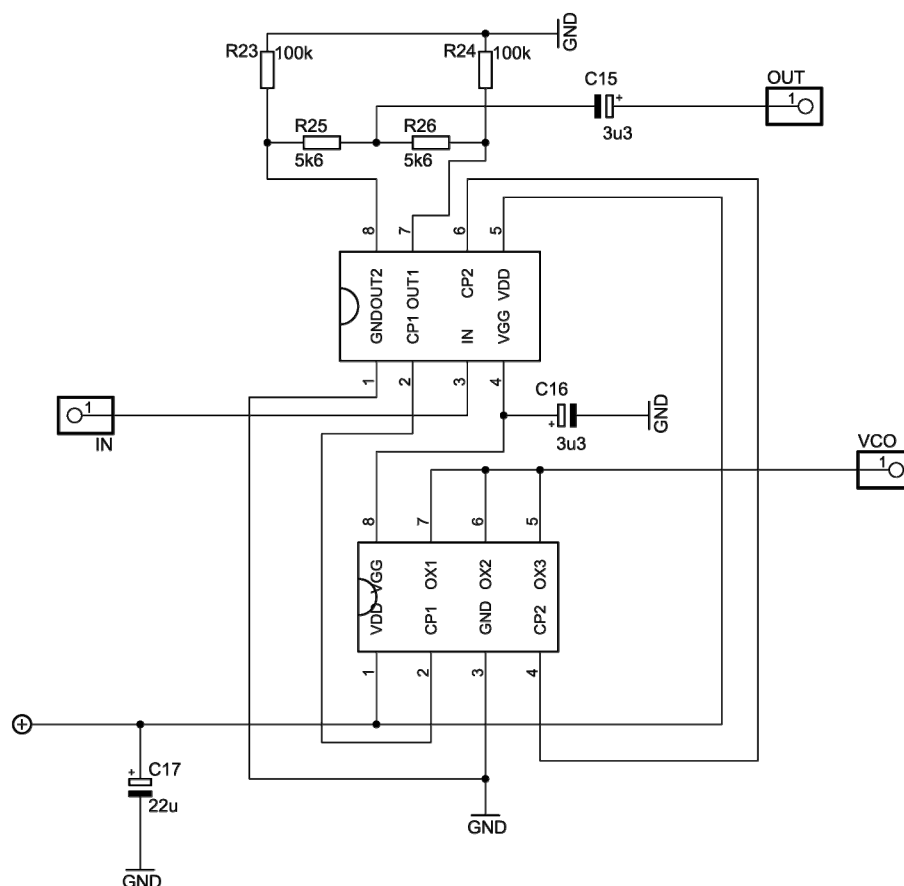
Obr. 4.5: Schéma zapojení VCO

V pravé horní části Obr. 4.5 je uveden obvod MN3102. Je to jednoduchý generátor řídicích impulsů, který je určený pro řízení integrovaných obvodů z řady MN3200. Více podrobných informací o tomto prvku obsahuje následující kapitola 4.5.1. Díky této klasické koncepci zapojení lze získat z obvodu MN3102 konstantní hodnotu taktovacího kmitočtu. Obvod MN3102 avšak není opatřen napěťově řízeným vstupem pro ovládání frekvence, který potřebujeme pro naše použití.

V tomto případě nastupuje náš obvod VCO (SN74LS624), který nám tyto vstupy poskytuje. Vstup obvodu je ve schématu označen jako „FREQ“. Ten slouží přímo k nastavování kmitočtu v určitém rozsahu. Druhý vstup označený jako „RNG“ je zde v pozici pro jemné doladění hodnoty kmitočtu získaného po připojení kondenzátoru  $C_X$ , který je na Obr. 4.5 označen jako  $C_{14}$ . Správně zvolený kondenzátor udává maximální hodnotu kmitočtu obvodu, kterou je obvod schopen vyprodukovat při různých nastavených napěťových hodnot vstupů „FREQ“ a „RNG“. Hodnota použitého kondenzátoru v zařízení byla zvolena z grafu, viz. [14], v jednotkách nF. Z výstupu VCO označeném Y je obdélníkový průběh příslušné frekvence přiveden na vstup obvodu MN3102 a předává mu svoji frekvenci. V našem případě je zvolený rozsah frekvence 10 -100 kHz.

## 4.5 Analogový posuvný registr (Obvod MN3207 a MN3102)

Nejdůležitějšími prvky zařízení vytvářející hudební efekt CHORUS je samotný analogový posuvný registr (MN3207) a jeho řídicí obvod (MN3102). Pro zapojení obvodu MN3207 a MN3102 bylo čerpáno z materiálů dodávaných výrobcem (viz. [6] a [7]) a je zobrazeno na Obr. 4.6.



Obr. 4.6: Schéma zapojení obvodu MN3207 [7]

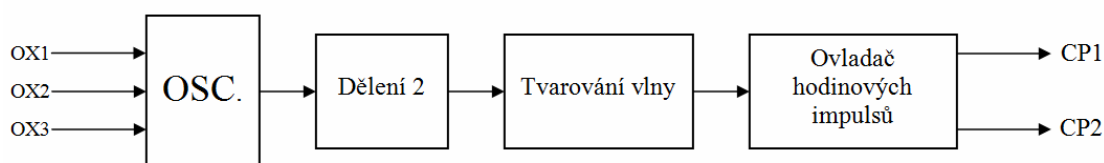
Kondenzátory  $C_{17}$  a  $C_{16}$  zde zastávají funkci blokovacích kondezátorů a kondezátor  $C_{15}$  je v pozici filtračního kondezátoru, který slouží k odstranění stejnosměrné složky. Ta mohla vzniknout průchodem zpracovávaného signálu zařízením a je jí nutné odstranit. V následující podkapitole se podíváme na prvky s počátečními písmeny MN podrobněji.

#### 4.5.1 MN3102

MN3102 je označován jako CMOS generátor hodinových impulsů neboli ovladač pro BBD zařízení, které pracují s malým napájecím napětím. Obvod generuje dva komplementární hodinové signály s nízkou výstupní impedancí, které jsou nezbytné pro řízení integrovaných obvodů řady MN3200. Obvod obsahuje napájecí výstup označený  $V_{GG}$ , který je připojen do stejně označeného vstupu obvodu s BBD. Hodnota napětí  $V_{GG}$  se dá vypočítat podle následujícího vztahu:

$$V_{GG(OUT)} = \frac{14}{15} V_{DD} \quad (5.9)$$

Z toho vyplývá, že je vhodné pro napájení řídicího obvodu použít stejnou referenční hodnotu napájení jako pro BBD obvod. Blokové schéma obvodu je uvedeno na obr.5.8.



Obr. 4.7: Blokové schéma obvodu MN3102 [6]

Na vstupy označené OX1 – OX3 je ve standardním zapojení pomocí R a C podle [9] získán konstantní taktovací kmitočet. Nastavený kmitočet je dále podělen dvěma a je zpracován se splněnými nároky na připojený obvod BBD (MN3207). Výstupem obvodu jsou dva komplementární taktovací signály označené jako CP<sub>1</sub> a CP<sub>2</sub>.

### 4.5.2 MN3207

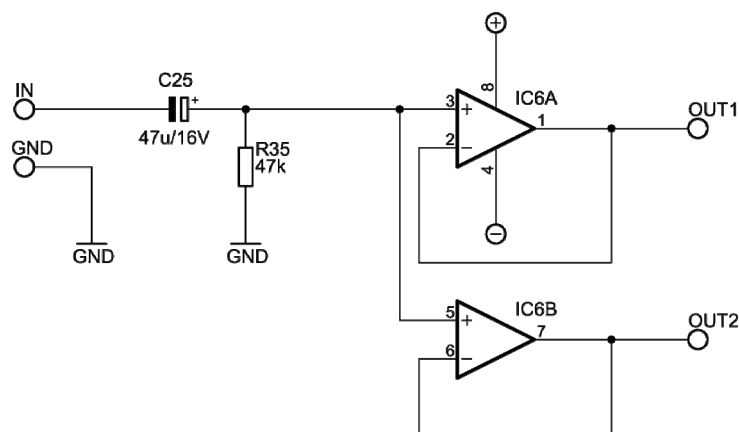
MN3207 je 1024-článek, zpožďující, nízko-šumový BBD obvod, který provádí zpoždění signálu. Zpoždění audio signálu se může pohybovat od 2,5 – 51 ms. Obvod je jednoznačně vhodný jako zařízení pro generování tzv. dozvukových efektů. Můžeme ho použít pro zařízení s proměnným nebo konstantním zpožděním signálu.

Mezi důležité parametry obvodu patří široký rozsah napájecího napětí  $V_{DD} = 4 \sim 10$  V (typicky 5 V). Frekvence řídicích hodinových impulsů se pohybuje v rozsahu 10 ~ 200 KHz. Tyto parametry uvádí výrobce v [6].

## 4.6 Vstupní a výstupní obvody

### 4.6.1 Vstupní díl

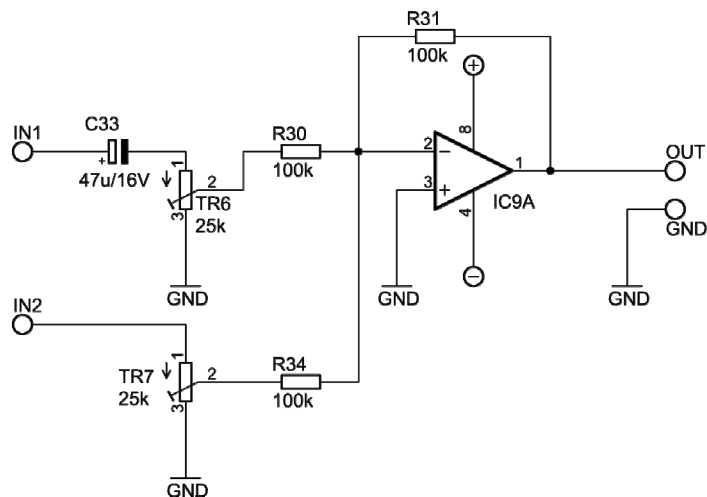
Na Obr. 4.8 je zobrazeno schéma vstupní jednotky zařízení. Vstupní signál budeme přivádět přes zabudovaný JACK konektor na svorkovnici v DPS. Signál bude dále postupovat přes vazební článek C<sub>25</sub>, R<sub>35</sub> na vstup OZ. Vazební RC článek nám zařídí případné oddělení stejnosměrné složky. Dále je zde použita dvojice OZ zapojených jako sledovač napětí. Ty nám zajišťují oddělení zdroje signálu, mohlo by totiž dojít k jejich vzájemnému ovlivnění. Z obrázku je vidět, že se nám zde původní signál rozdvojí na signálovou cestu 1 a 2. Z výstupu OUT1 bude signál postupovat na dolní propust a bude zpracován efektovou větví, za to signál z výstupu OUT 2 bude nezměněný a bude postupovat přímo na výstupní díl.



Obr. 4.8: Schéma zapojení vstupního dílu

## 4.6.2 Výstupní díl

Na Obr. 4.9 je zobrazeno schéma zapojení výstupního dílu. Nejdůležitější funkcí toho dílu je funkce tzv. „sčítačky“. Operační zesilovač IC9A je na obrázku zapojen jako invertující sčítací zesilovač, který má za úkol sečíst původní signál (IN2) a signál zpracovaný efektovou linkou (IN1). K nastavení příslušné váhy signálu je zde u každé větve použit trimr TR6 a TR7. Trimr představuje vlastně dělič s poměrem zesílení od 0 do 1 násobku jeho původní velikosti. Výstupní signál po sečtení obou větví by měl mít přibližně stejnou hodnotu zesílení jako původní signál. Signál je na výstupu přiveden na svorky JACK umístěné v panelu.



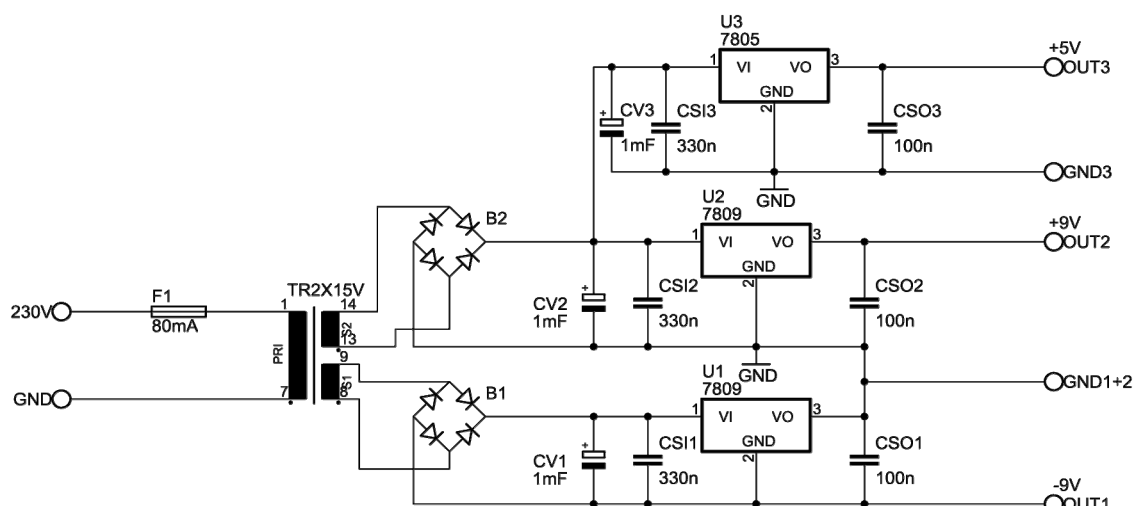
Obr. 4.9: Schéma zapojení výstupního dílu

## 4.7 Napájecí zdroj zařízení

Napájecí zdroj zařízení je možné rozdělit do několika částí. Celkové schéma zapojení napájecí části zařízení je zobrazeno na Obr. 4.11.

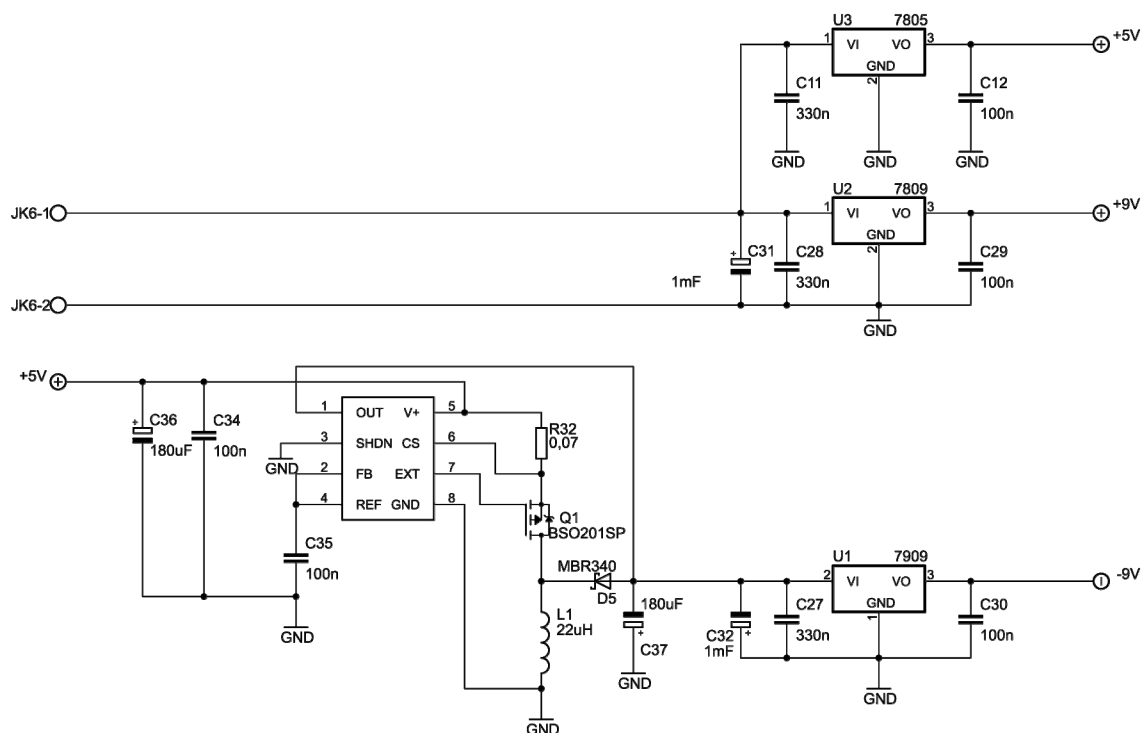
Na vstupní napájecí svorky zařízení jsou připojeny na výstup AC/DC adaptéru. Adaptér se připojuje na síťové napětí a na svém výstupu má stejnosměrné napětí  $U_2 = 12 \text{ V}$ . Maximální výstupní proud adaptéru je  $I_2 = 500 \text{ mA}$ .

Za vstupními svorkami je napájecí napětí po vyfiltrování a stabilizování rozděleno na tři větve určité napěťové hodnoty. IO v zařízení potřebují ke své činnosti symetrické napájecí napětí. Toto napájení je možné získat například z transformátoru s dvěma sekundárními vinutími. Následné střídavé napětí je za sekundárním vinutím usměrněno, vyfiltrováno a stabilizováno na požadovanou hodnotu. Taková koncepce je zobrazena na Obr. 4.10.



Obr. 4.10: Schéma napájecího zdroje realizovaného pomocí transformátoru

Avšak v zařízení je použito napájecího adaptéru s kladným výstupním napětím, proto byl do koncepce záporné napájecí cesty vložen invertující DC/DC měnič. Měnič byl zvolen s ohledem na požadující nároky. Jsou to vstupní napětí, výstupní napětí a výstupní proud potřebný pro zařízení. MAX776 je měnič od firmy MAXIM, který díky svému doporučenému zapojení uvedeném v [3] vyhovuje daným požadavkům. Na vstup měniče MAX776 je přivedeno napětí 5 V, které přivádíme z výstupní svorky stabilizátoru 7805. Měnič nám z přiváděného vstupního napětí vytvoří na výstupní napětí  $U = -15 \text{ V}$ . Výstupní napětí je poté už jen přivedeno na záporný stabilizátor 7909, na jehož výstupu je požadovaných  $-9 \text{ V}$ . V doporučeném zapojení součástky MAX776 je mezi piny integrovaného obvodu zapojen odpor  $R_{32}$ . Tento odpor slouží k nastavení maximální hodnoty výstupního proudu z měniče. V [3] je uveden graf závislosti vstupního napětí na výstupním proudu při konstantním výstupním napětí  $U_{\text{OUT}} = -15 \text{ V}$  a různých hodnotách odporu  $R_{32}$ . Pro naši aplikaci byl zvolen odpor s hodnotou  $0,07 \Omega$ . Při takto zvolené hodnotě odporu je maximální výstupní proud  $I_2 = 0,4 \text{ A}$ . Takto nízká hodnota odporu je v praxi velice špatně dostupná, a proto byl tento odpor nahrazen odporovým drátem určité délky. Materiál použitého odporového drátu je z konstantanu.



Obr. 4.11: Schéma zapojení napájecího zdroje

#### 4.7.1 Odporový drát z Konstantanu

Konstantan je slitina kovů patřící do skupiny odporových materiálů. Přesné složení konstantanu obsahuje 54% Cu (mědi), 45% Ni (niklu) a 1% Mn (manganu). Základní fyzikální vlastnosti konstantanu jsou uvedeny v Tab. 4.1 z [2]. Použitý odporový drát z konstantanu pro odpor  $R_{32}$  má průměr  $d = 0,18$  mm a jeho odpor  $R = 18,5 \text{ } \Omega/\text{m}$ . Námi požadovaná hodnota odporu je  $0,07 \text{ } \Omega$ . Této hodnotě odporu odpovídá délka drátu  $l = 4$  mm.

Tab. 4.1: Tabulka základních fyzikálních vlastností konstantanu

Parametr	Symbol	Hodnota	Jednotky	Poznámky
Rezistivita	$\rho$	0,49	$\mu\Omega\text{m}$	
Teplotní součinitel odporu	$\alpha$	0,00002	-	při $T = 20^\circ\text{C}$
Hustota	$\rho$	8,9	$\text{g}/\text{m}^3$	
Měrná tepelná kapacita	$c$	0,41	$\text{kJ}/\text{kgK}$	
Součinitel teplotní roztažnosti	$\Delta X$	0,000015	$1/\text{K}$	
Teplota tání	$t_f$	1225 - 1300	$^\circ\text{C}$	

Hodnota odporu  $R$  je teplotně závislá podle:

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T) , \quad (5.10)$$

kde  $R_0$  je hodnota odporu při teplotě  $20^\circ\text{C}$ ,  $\alpha$  je teplotní součinitel odporu a  $\Delta T$  je rozdíl teplot. V rovnici (5.10) máme pro výpočet odporu všechny uvedené veličiny,

kromě rozdílu teplot  $\Delta T$ . K hodnotě dojdeme pomocí základních výpočtů. Průřez odporového drátu vypočítáme podle vztahu:

$$S = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{\pi \times 0,004^2}{4} = 0,025 \text{ mm}^2. \quad (5.11)$$

Zvolíme si předpokládanou hodnotu proudu protékajícího odporem  $R_{32}$ , a to  $I = 0,1 \text{ A}$ . Nyní vypočítáme úbytek napětí na odporu  $U_R$  a hodnotu výkonu  $P$ :

$$U_R = R_{32} I = 0,07 \times 0,1 = 7 \text{ mV}, \quad (5.12)$$

$$P = U_R I = 0,007 \times 0,1 = 0,7 \text{ mW}. \quad (5.13)$$

Z hodnoty výkonu vypočítáme hodnotu vykonané práce  $W$ . K výpočtu použijeme následující vztah:

$$P = \frac{W}{t}, \quad (5.14)$$

hodnotu času  $t$  si zvolíme, a to  $t = 60 \text{ s}$ . Ze vztahu 5.14 vyjádříme vztah pro výpočet práce:

$$W = Pt = 0,0007 \times 60 = 42 \times 10^{-3} \text{ J}. \quad (5.15)$$

Jouleovo teplo  $Q$  je teplo, které vzniká ve vodiči průchodem elektrického proudu. Ze vztahu pro výpočet velikosti Jouleova tepla můžeme říct, že se  $Q = W$ . Rozdíl teplot  $\Delta T$  se dá vyjádřit ze vztahu pro výpočet měrné tepelné kapacity  $c$ :

$$\Delta T = \frac{Q}{mc}. \quad (5.16)$$

K výpočtu potřebujeme dosadit do vzorce hodnotu hmotnosti  $m$ . Hmotnost vypočítáme ze vztahu:

$$m = \rho Sl, \quad (5.17)$$

kde  $\rho$  je hustota materiálu uvedená v Tab. 4.1,  $S$  je vypočítaný průřez podle vztahu 5.11 a  $l$  je zvolená délka odporového drátu. Dosadíme tyto hodnoty do vztahu 5.17 a získáme hmotnost našeho kusu odporového drátu:

$$m = \rho Sl = 8,9 \times 0,025 \times 10^{-2} \times 0,4 = 8,9 \times 10^{-4} \text{ g}. \quad (5.18)$$

Dosadíme všechny hodnoty do vztahu 5.16 a získáme hodnotu  $\Delta T$ :

$$\Delta T = \frac{Q}{mc} = \frac{42 \times 10^{-3}}{8,9 \times 10^{-4} \times 410} = 0,1151^\circ\text{C}. \quad (5.19)$$

Rozdíl teplot  $\Delta T$  byla poslední veličina potřebná k výpočtu hodnoty odporu při změně teploty ze vztahu 5.10. Hodnota odporu  $R$  je:

$$R = R_0(1 + \alpha \Delta T) = 0,07 \times (1 + 0,1 \times 10^{-4} \times 0,1151) = 0,070000857 \Omega. \quad (5.20)$$

Rozdíl hodnot vypočteného a původního odporu  $\Delta R$  při hodnotě protékajícího proudu za dobu  $t$  je:

$$\Delta R = R - R_0 = 8 \times 10^{-6} \Omega = 8 \mu\Omega \quad (5.21)$$

Tuto hodnotu můžeme vyjádřit v procentech:

$$\Delta R = 0,0114\% . \quad (5.22)$$

Z vypočítané hodnoty je vidět, že hodnota odporu se při konstantní hodnotě protékajícího proudu za dobu 60 sekund změnil nepodstatně. V Tab. 4.2 jsou uvedeny vypočítané hodnoty změny odporu pro různé doby chodu zařízení.

Tab. 4.2: Tabulka vypočtených hodnot změny odporu po různá  $t$

$t$ [s]	60	300	600	1800	3600	4500	6000
$\Delta R$	0,0230	0,1644	0,2302	0,6906	1,3812	1,7265	2,3020



## 5 KONSTRUKCE DPS A SAMOTNÉHO ZAŘÍZENÍ

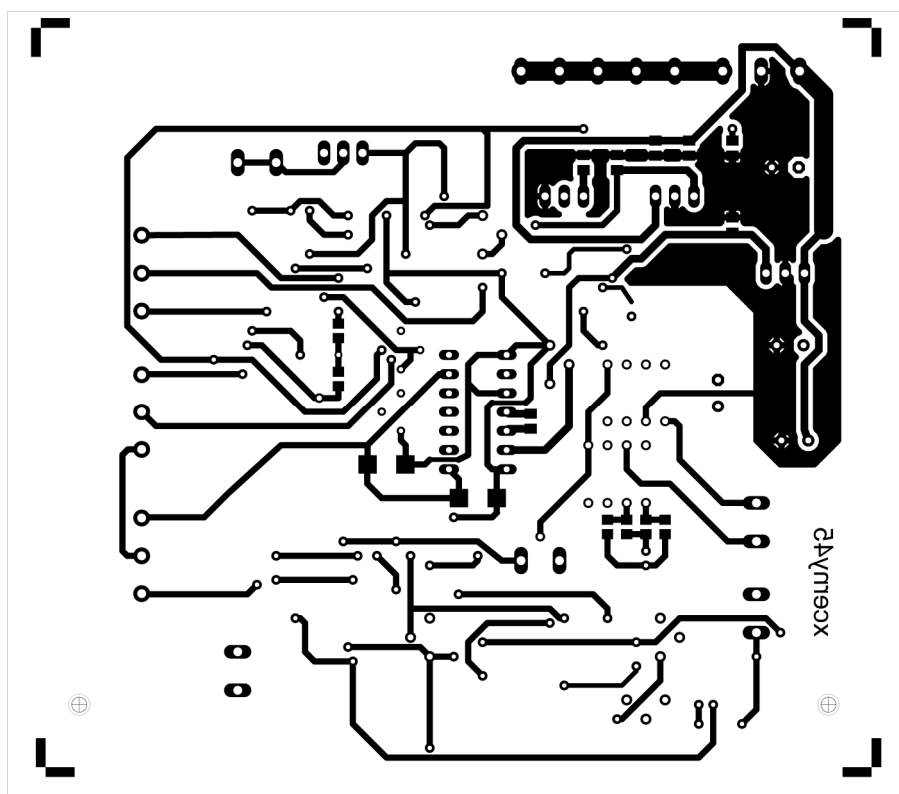
S předchozími požadavky na zařízení byly stanoveny další konstrukční kritéria, která by mohla zkreslit práci zařízení, a tím i požadované výsledky. Jsou to:

- největší odstup signálu od šumu,
- potlačení přeslechů vznikajících na vedení,
- útlum signálu průchodem vedení,
- tepelná zatížitelnost součástek,
- vliv parazitních kapacit a indukčností.

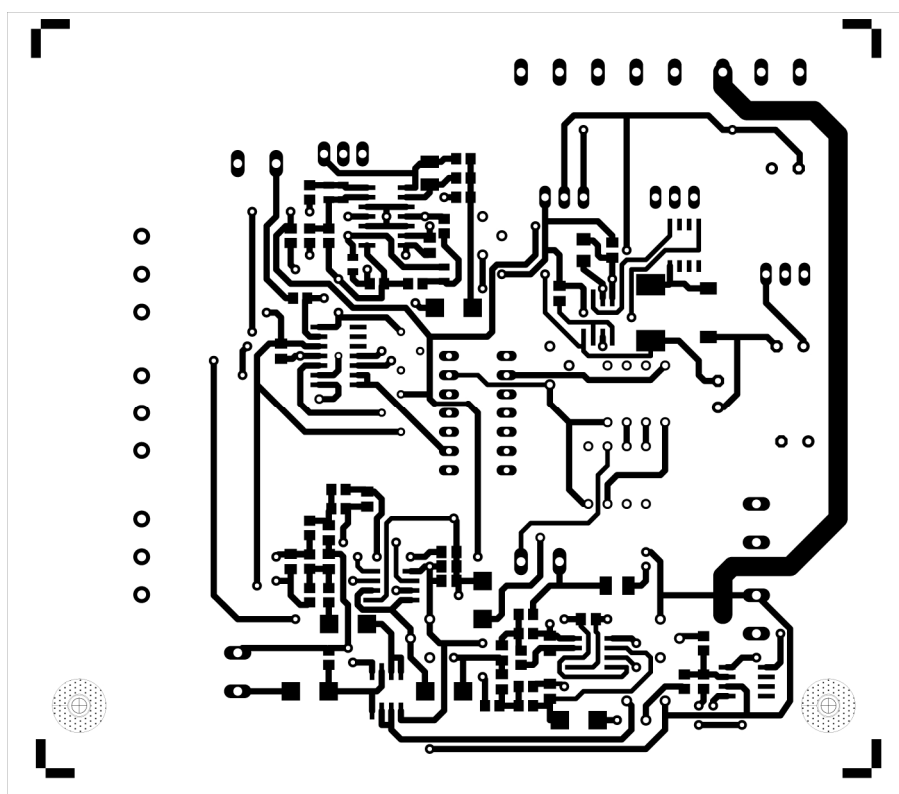
Vyjmenované rušivé vlivy na chod zařízení potlačíme dodržováním některých konstrukčních zásad. Při návrhu zařízení byly tyto požadavky hlídány, aby se co nejvíce zamezilo vyjmenovaným vlivům zkreslení signálu. Pro potlačení nežádoucích vlivů bylo nutno dodržet jistá doporučení z [12]. Jsou to:

- zkrácení délky spojů,
- zkrácení délky spojů jdoucích rovnoběžně,
- oddálení signálového vodiče od napájecího,
- zavedení zemního vodiče tam, kde nevede signálový vodič,
- použití stíněného vodiče.

Návrh desky plošných spojů byl realizován podle celkového schématu zařízení, viz. PŘÍLOHA 3. Deska je oboustranná a má prokovené spoje mezi vrstvou strany spojů a součástek. Na Obr. 5.1 je návrh DPS ze strany spojů a na Obr. 5.2 ze strany součástek. Osazovací výkresy ze strany spojů a součástek jsou uvedeny v PŘÍLOZE 4.



Obr. 5.1: Deska plošných spojů zařízení ze strany spojů



Obr. 5.2: Deska plošných spojů zařízení ze strany součástek

Většina použitých součástek je v zařízení použita v SMD provedení. Tento výběr nás vedl k již zmíněným doporučením. SMD provedení nám umožňuje co nejmenší vedení cest mezi vodiči díky bezvývodovému provedení součástek. Díky takovému výběru nám celkově klesly rozměry navrhované DPS a tedy i konstruovaného zařízení. Takto navrhované a konstruované zařízení má přibližné rozměry sériové vyráběných efektů od světových výrobců. Další výhodou SMD provedení byla menší jmenovitá (až deseti násobná) tolerance hodnot vybíraných součástek do zařízení. Rezistory a keramické kondenzátory byly vybírány z řady 0805. Polarizované kondenzátory byly použity, místo elektrolytických, tantalové. Velikost pouzdra tantalových kondenzátorů se odvíjela od jejich hodnot a od nabídky prodejce. V zařízení byly použity pouzdra z označením SMD C a B.

Potenciometry  $P_1$  až  $P_3$  je nezbytné na DPS vložit do svorek, aby jejich nastavovací část jezdcy byla vyvedena na horní straně panelu. Takové řešení může schovávat různé problémy, proto musí být potenciometry dostatečně uchyceny ve svorkovnici. Vhodná jsou i jiná podpůrná zařízení pro toto uchycení. V našem zařízení byl použit zbytek materiálu z výroby DPS. Do této desky byly vyvrtány 3 otvory požadovaného průměru a do nich byly potenciometry uchyceny. Pod potenciometry jsou již osazené součástky DPS a je možné, že při manipulaci uživatele budou tyto součástky mechanicky namáhány a mohlo by dojít k jejich poškození. Proto je vhodné mezi potenciometry a osazené součástky vložit proužek gumového materiálu pro zmírnění tohoto namáhání. Zmíněné provedení uchycení potenciometrů do pomocné desky je zobrazeno na Obr. 5.3.

Klíčové obvody MN3102, MN3207 a VCO (SN74LS624) jsou v zařízení použity v klasickém SMT provedení. Vhodné je, aby tyto součástky nebyly osazeny přímo do DPS, ale aby byly osazeny do příslušných patič pro integrované obvody. Takové řešení je velice vhodné z důvodu jejich manipulace např. při výměně.

Na Obr. 5.1 si můžeme povšimnout v pravém horním rohu části, která je tzv. vylitá mědí. V této části DPS je umístěna převážně napěťová část, proto je vhodné tuto část nechat spojenou celistvou vrstvou. Plošky součástek, které jsou zde zapojeny, jsou spojeny se zemním vodičem. Dalším úkolem této celistvé vrstvy je například odvod tepla od okolí.

V celkovém schématu zařízení (PŘÍLOZE 3) si můžeme povšimnout různého značení zemního vodiče. Zemní vodič bylo vhodné, kvůli možným vlivům rušení signálu, rozdělit na výkonový zemní vodič a na signálový zemní vodič. Zemní vodiče se poté spojí v jednom bodě, zde u vstupní napájecí svorky.

Na Obr. 5.3 můžeme vidět osazenou desku plošného zařízení. V obrázku jsou shrnuty důležité nastavovací trimry  $TR_1$  –  $TR_7$ :

1.  $TR_1$  – slouží k jemnému dostavení výstupní frekvence generátoru LFO,
2.  $TR_5$  – slouží k dostavení výstupní frekvence VCO,
3.  $TR_2$  – slouží k zesílení signálu z generátoru LFO,
4.  $TR_3$  – slouží k přidání stejnosměrné složky signálu z LFO,
5.  $TR_4$  – slouží k přidání stejnosměrné složky signálu k vstupnímu signálu,
6.  $TR_6, TR_7$  – slouží k nastavení úrovně signálu před sčítacím obvodem.



Obr. 5.3: Osazená deska plošných spojů zařízení

Zařízení je uloženo do sériově vyráběné konstrukční krabičky s označením U-KP17. Rozměry krabičky jsou 38 x 119 x 143 mm. Vstupní svorky pro vstupní a měřící zařízení jsou JACK 6,3 a konektor BNC (na koaxiální kabel) pro připojení generátoru vstupního signálu. Konektor JACK má ve svém provedení spínač. Ten slouží k přerušení signálu z konektoru BNC při připojení zařízení do konektoru JACK. Signál z konektoru BNC by mohl projít přes vstupní svorku JACK na výstup připojeného zařízení a mohl by ho poničit. Na opačné straně krabičky jsou zapojeny výstupní konektory JACK pro MONO, STEREO a výstupní konektor BNC pro osciloskop. Signál na výstupní svorku STEREO vytvoříme jednoduchou „fintou“. Na vstup pravého kanálu konektoru JACK přivedeme původní neupravený signál a na vstup levého kanálu konektoru JACK přivedeme signál z výstupní svorky (upravený). Nyní využijeme tzv. psychoakustické vlastnosti lidského ucha a tím vznikne pro lidský sluch výsledný efekt CHORUS.

Spojení konektorů v panelech konstrukční krabičky se svorkovnicemi na DPS je provedeno pomocí stíněných kabelů. Stínění zaručuje, aby se signály procházející vodiči umístěnými blízko sebe navzájem neovlivňovali a aby bylo zaručeno potlačení okolních parazitních vlivů na tento signál.

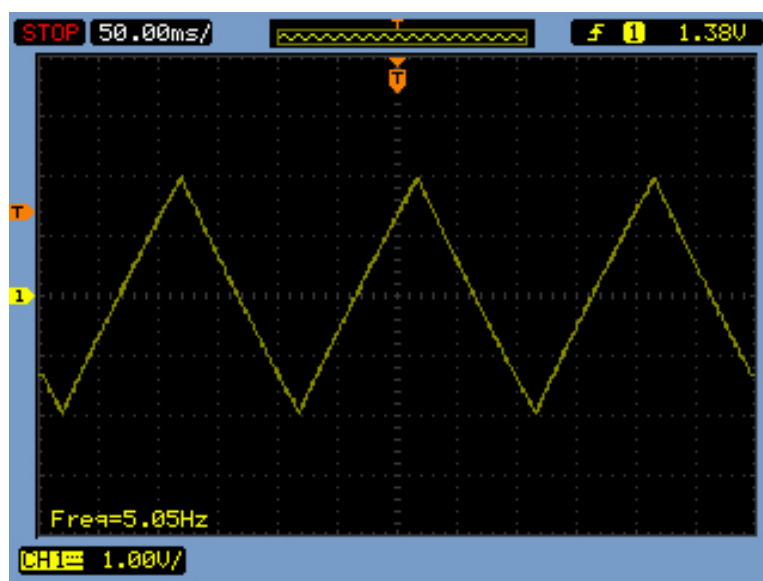
## 6 NÁVOD LABORATORNÍ ÚLOHY

V této kapitole bude uveden postup laboratorní úlohy na zařízení efektu CHORUS do předmětu BSHE (STUDIOVÁ A HUDEBNÍ ELEKTRONIKA). K zmíněné laboratorní úloze bude potřeba dvou pomocných zařízení, generátor signálu a osciloskop. Můžeme přidat i další pomocné zařízení, a to například přehrávač CD a sluchátkový zesilovač pro praktickou ukázkou efektu.

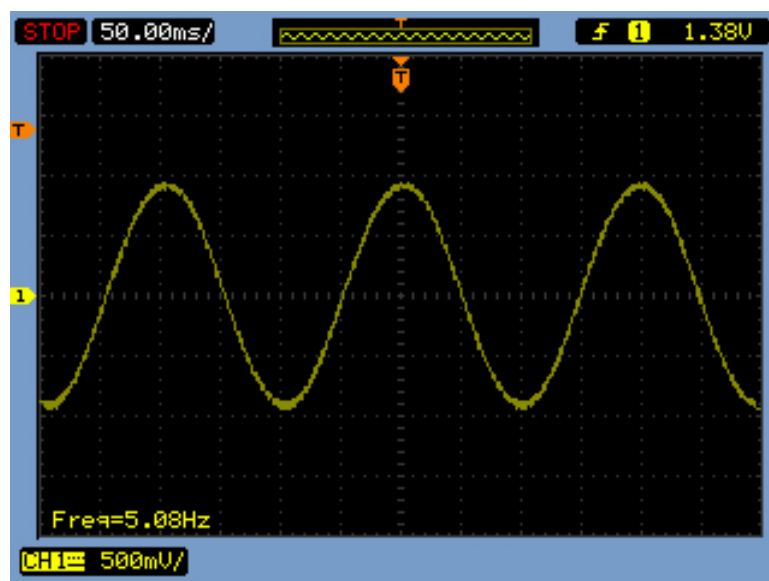
### 6.1 Postup

V této podkapitole je napsán postup pro žáky měřící laboratorní úlohu na tomto příprvku v laboratoři. U každé kapitoly je také uveden předpokládaný průběh signálu zařízení. Průběhy byly změřeny na ústavu telekomunikací v projektové laboratoři PA-272. K měření byli použity generátor průběhů Agilent 33210A, sériové číslo MY48005141 a osciloskop Agilent Technologies DSO 1012A, sériové číslo CN50229757.

1. Zapněte na svém pracovišti měřící přípravek efektu CHORUS, generátor signálu a osciloskop.
2. Připojte vstup osciloskopu k zařízení. Na Červeně označené svorky připojte zemní konec vodiče. Druhý konec vodiče připojte do zelené svorky a zobrazte si průběh signálu jdoucího z výstupu LFO. Pro rychlé nastavování zobrazení průběhu na osciloskopu použijte tlačítko *Auto-Scale*. Nyní si na displeji osciloskopu zobrazte hodnotu frekvence signálu. Stiskněte tlačítko *Measure*, v položce *Source* a nastavte používaný kanál osciloskopu. Dále v podnabídce zvolte položku *Time* a zvolte hodnotu *Freq*. Na spodní části displeje se vám tato hodnota zobrazí. Nyní si vyzkoušejte změnu kmitočtu generátoru a změnu tvaru signálu pomocí přepínače  $S_1$ .

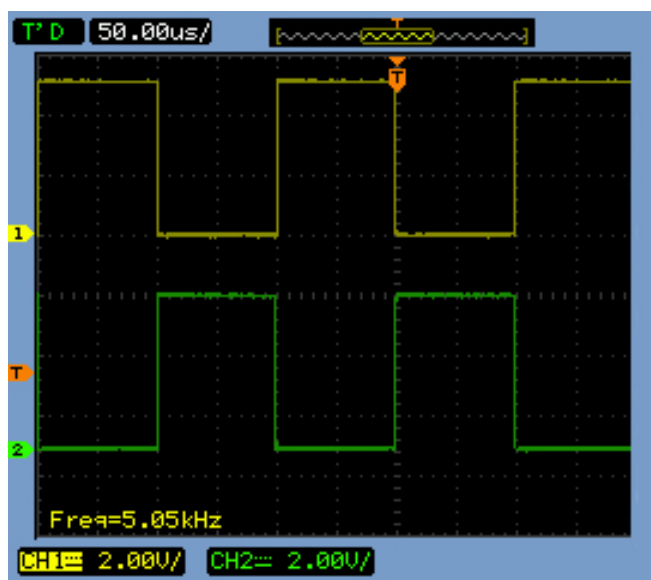


Obr. 6.1: Předpokládaný průběh pilovitého signálu



Obr. 6.2: Předpokládaný průběh harmonického signálu

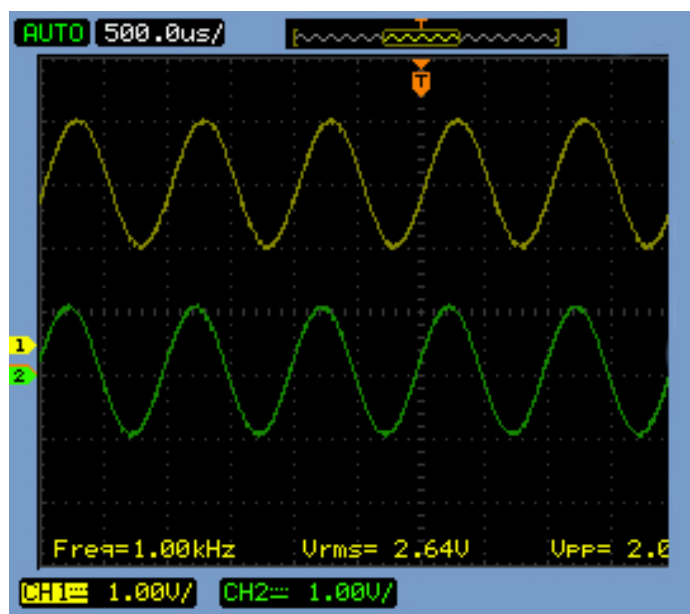
3. Nyní si zobrazte pomocí dvou měřících vodičů na vstupu 1 a 2 komplementární řídicí signály  $CP_1$  a  $CP_2$  (žluté svorky). Pro rychlé zobrazení využijte *Auto-Scale*. Změnou hodnot potenciometru  $P_1$  (zelený) a  $P_2$  (žlutý) můžete sledovat změnu kmitočtu při rozmítání pomaluběžným signálem. Hodnotu potenciometru  $P_2$  nastavte na minimum a pomocí potenciometru  $P_3$  (modrý) budete provádět statická měření. Hodnotu potenciometru musíte měnit plynule. Sledujte změnu kmitočtu řídicích signálů.



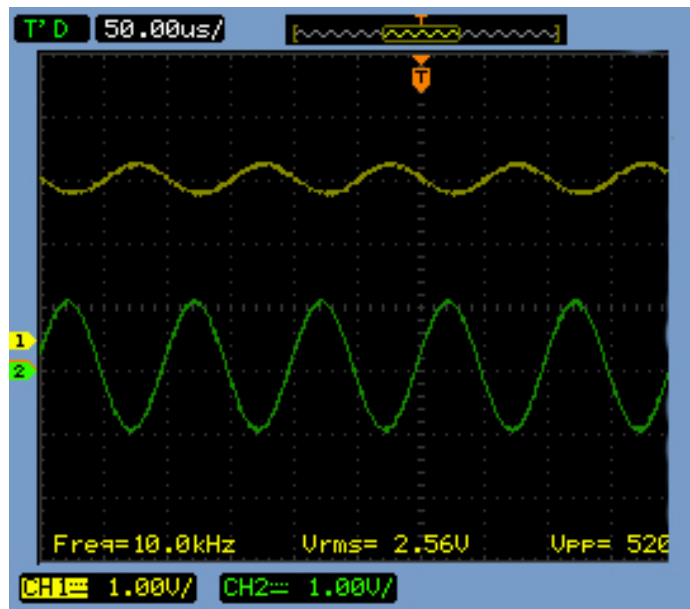
Obr. 6.3: Předpokládaný průběh komplementárních řídicích signálů

4. Na vstup měřícího přípravku a na vstup osciloskopu připojte generátor signálů. Druhý vstup osciloskopu připojte do modrého konektoru přípravku označeného „PŘED BBD“. Nyní na generátoru nastavte hodnotu frekvence 100 Hz, amplitudu 1,5 V a stejnosměrnou složku na 0 V a stiskněte tlačítko označené *Output*. Pro rychlé zobrazení opět můžete použít tlačítko *Auto-Scale*. Na

osciloskopu máte zobrazený vstupní signál a signál po průchodu dolní propustí 4. řádu. Postupně zvyšujte hodnotu kmitočtu vstupního signálu, nezapomínejte měnit hodnotu časové základny a nebo využívejte tlačítko pro rychlé nastavení. Od mezní frekvence dolní propustí ( $f_m = 4$  kHz) pozorujte potlačení hodnoty vstupního signálu.



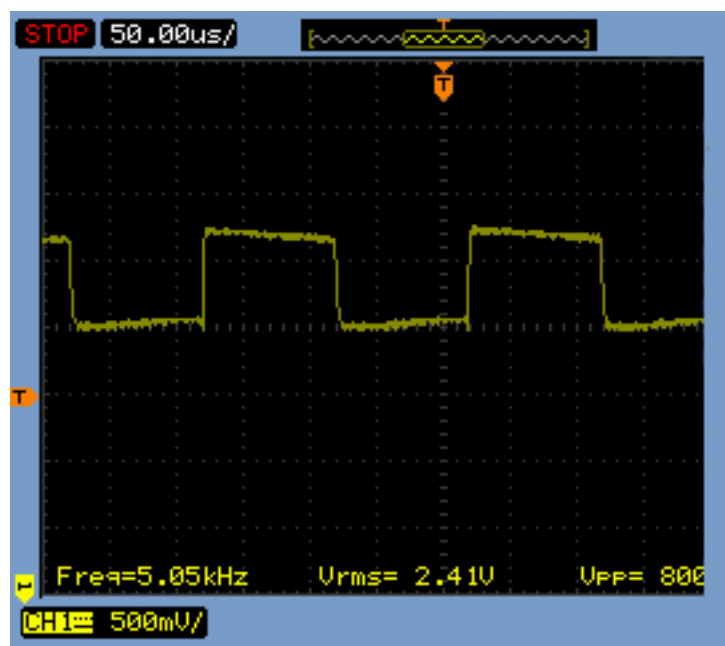
Obr. 6.4: Průběh vstupního signálu před a za dolní propustí – 1kHz



Obr. 6.5 Průběh vstupního signálu před a za dolní propustí – 10kHz

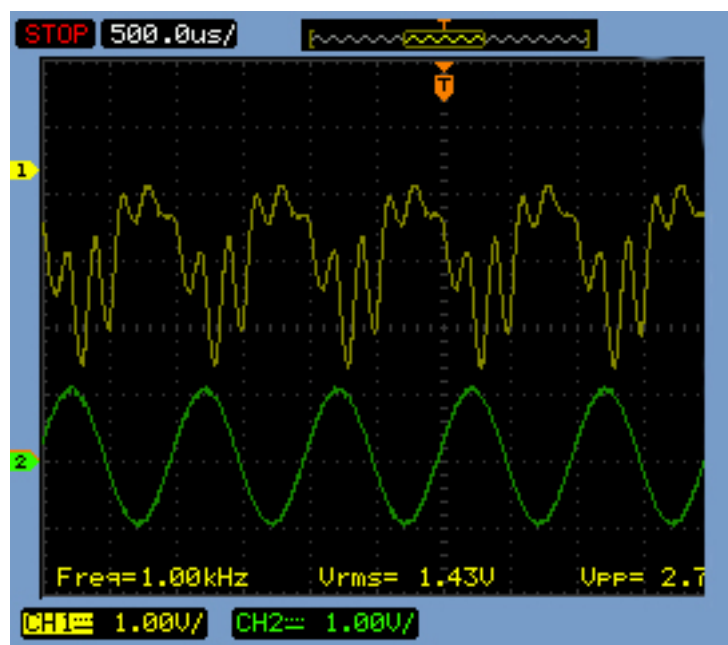
5. Přepojte druhý vstup osciloskopu na svorku modré barvy označené „ZA BBD“ a zobrazte si výstupní signál z BBD. Vidíte zcela odlišný signál od původního harmonického signálu. Přemýšlejte, jak vzniknul takový signál a zobrazte si hodnotu jeho kmitočtu. Změňte hodnoty potenciometrů  $P_1 - P_3$  a pozorujte změnu signálu na výstupu BBD, jak pro statická měření tak i pro měření pomocí rozmítaného signálu.





Obr. 6.6: Předpokládaný průběh výstupního signálu za BBD

6. Nyní porovnejte vstupní a výstupní signál. Připojte druhý kanál osciloskopu na výstupní konektor přípravku. Z displeje osciloskopu je vidět, že signál je zpožděný přesně o půl periody. Nyní opět budete měnit hodnoty potenciometrů a sledujte změny zobrazovaných průběhů.



Obr. 6.7: Předpokládaný výstupní signál efektu CHORUS

7. Odpojte generátor signálu a osciloskop od příslušných svorek. Připojte k vstupu zařízení CD přehrávač a pusťte CD s příloženými ukázkami. Na výstup připojte sluchátkový zesilovač. Na CD jsou nahrané vzorky kytarového nástroje.



## 7 ZÁVĚR

Obsahem této bakalářské práce byla kompletní konstrukce laboratorního zařízení efektu CHORUS a návod pro jeho měření do předmětu STUDIOVÁ A HUDEBNÍ ELEKTRONIKA. Bakalářská práce byla rozdělena do několika částí.

První část byla věnována teoretickému rozboru efektů využívajících principu zpožďovací linky. Dále byl proveden teoretický rozbor obvodů CCD pracujících na principu BBD. Následně byly uvedeny základní vztahy a matematický popis signálů vyskytujících se v efektu CHORUS.

V další části byl uveden postup při realizaci zařízení. Zařízení bylo rozděleno a popsáno podle jednotlivých bloků. Byly zde shrnuty všechny body zadání a následně realizovány. Například změna tvaru vlny, ovládání řídicích signálů a statický režim. V této části byl uveden návrh samostatného napájecího zdroje pomocí AC/DC adaptéru a DC/DC měniče MAX776 podle doporučeného zapojení výrobce. Avšak tento blok samotného měniče DC/DC se nepodařilo zprovoznit a z časových důvodů bylo přistoupeno k druhému zmiňovanému řešení. Zdroj je umístěn podle zadání do samostatné konstrukční krabičky. Takové řešení vyhovuje i námi stanovené podmínce, eliminovat škodlivé rušení na signálovou část zařízení. Schéma zapojení a potřebná dokumentace tohoto zdroje je uvedena v PŘÍLOZE 5.

Předposlední část práce se věnuje konstrukčním předpokladům a doporučením. Je zde uveden návrh DPS a potřebné informace pro tzv. oživování výrobku. Součástky a pájecí pasta byly osazovány na plošky DPS pomocí osazovacího poloautomatu. Osazená deska se poté nechala přetavit reflow pecí.

V poslední části bylo přistoupeno již k samotnému měření na zařízení a návodu pro laboratorní úlohu na konstruovaném přípravku.

K práci je přiložené DVD s příslušnými soubory. DVD obsahuje schéma a výkres DPS, příslušné dokumentace od výrobce k používaným součástkám a složku ukázek pro praktickou část laboratorní úlohy.

# LITERATURA

- [1] BOSS, *SERVICE NOTES : BOSS CE-5 Chorus Ensemble*. 1st edition. [s.l.] : BOOS, Dec. 1991. 4 s. Dostupné z WWW: <<http://www.eserviceinfo.com/download.php?fileid=41773>>
- [2] ČERNÝ, V., Elektrický ohřev : odporový, dielektrický, obloukový, elektronový a laserový (1). *ELEKTRO*. 2004, 10, s. 56. Dostupný také z WWW: <<http://www.odbornecasopisy.cz/download/el100456.pdf>>
- [3] MAXIM, *MAX776: -5V/-12V/-15V or Adjustable, High-Efficiency, Low IQ Inverting DC-DC Controlers*. Data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.maxim-ic.com/datasheet/index.mvp/id/1177>>
- [4] MECA, P., *Amatérské rádio* číslo 6/1999, str. 13
- [5] MELEN, R., BUSS, D., *Charge coupled devices: Technology and Applications*. IEEE Press, New York, 1977
- [6] PANASONIC, *MN3102 Clock Generator Driver/Driver for MN3000 series BBD*. Data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-110/DSAP0010406.html>>
- [7] PANASONIC, *MN3207 1024-Stage Low Voltage Operation, Low Noise BBD*. Data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-24/DSA-472331.html>>
- [8] PTÁČEK, L. Jak pracují efekty I. *Muzikus : magazín pro muzikanty* [online]. 2008, 03, [cit. 2010-12-07]. Dostupný z WWW: <<http://www.muzikus.cz/pro-muzikanty-clanky/Jak-pracuji-efekty-I~19~leden~2009/>>
- [9] PUNČOCHÁŘ, J., *Operační zesilovače v elektronice*. BEN - technická literatura, Praha, 2005
- [10] ŘÍHA, Kamil. *Vícevětňový efekt CHORUS s CCD*. Brno, 2003. 54 s. Diplomová práce. VUT Brno, FEKT, Ústav TLI
- [11] SCHIMMEL, J. *BSHE Zvukové Efekty*. Prezentace k přednáškám. Brno: FEKT VUT v Brně
- [12] VRBA, K.; KUBÁNEK, D. *Konstrukce elektronických zařízení. Kód ET TKO 07-068*. Brno: VUT FEKT, 2007. s. 1-183
- [13] VRBA, K., LATTENBERG, I., MATĚJÍČEK, L. *Analogová technika - TKO 008*. Brno: VUT Brno, 2002. s. (107 s.)
- [14] TEXAS INSTRUMENTS INCORPORATED, *Voltage-Controlled Oscillators*. Data sheet. Dostupný z WWW: <<http://www.datasheetarchive.com/pdf-datasheets/Datasheets-36/DSA-714314.html>>

# SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

BBD	Bucket Brigade Device (obvod kbelíkové brigády)
BSHE	Studiová a Hudební Elektronika
CCD	Charge Coupled Device (obvody nábojově vázaných struktur)
VCO	Voltage-Controlled Oscillator (napětově řízený oscilátor)
LFO	Low-Frequency Oscillator (nízkofrekvenční oscilátor)
MOS	Metal–Oxide–Semiconductor
FET	Field-Effect Transistor (tranzistor řízený polem)
BKO	Bistabilní Klopný Obvod
LED	Light Emitting Diode (světlo vyzařující dioda)
OZ	Operační Zesilovač
DP	Dolní propust
SMD	Surface Mount Device (součástka pro povrchovou montáž plošných spojů)
SMT	Surface Mount Technology (součástka s vývody pro pájení do plošného spoje)
DPS	Deska Plošných spojů
CD	Compact Disk

$u(t)$	okamžitá hodnota napětí
$v(n)$	stavová proměnná
$H(z)$	přenosová funkce systému
$\omega$	úhlová frekvence
$t$	čas
$\tau$	okamžitá hodnota zpoždění
$T$	perioda
$f$	frekvence
$\beta$	dělicí poměr
$K_0$	přenos dolní propusti
$A_u$	napětový přenos
$m$	hmotnost
$d$	průměr
$l$	délka
$R$	odpor
$\rho$	rezistivita

$\alpha$	teplotní koeficient odporu
$\rho$	hustota
$c$	měrná tepelná kapacita
$\Delta T$	rozdíl teplot
$S$	průřez
$W$	práce
$Q$	joulovo teplo
$P$	výkon

$A$	ampér
$F$	farad
$Hz$	hertz
$V$	volt
$W$	watt
$J$	joule